

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Porovnání citlivosti Mach-Zehnderova interferometru při použití  
různých typů optických vláken**

**Comparison of the Sensitivity of the Mach-Zehnder  
Interferometer Using Different Types of Optical Fibers**

## Zadání bakalářské práce

Student: **Andrea Pastuchová**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: Porovnání citlivosti Mach-Zehnderova interferometru při použití  
různých typů optických vláken  
Comparison of the Sensitivity of the Mach-Zehnder Interferometer  
Using Different Types of Optical Fibers

Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši o Mach-Zehnderově interferometru a jednotlivých typech jednovlákových vláken.
2. Sestavte prototyp Mach-Zehnderova interferometru.
3. Pomocí měřicí karty NI USB-6210 realizujte měření interferencí vzniklých akustickou vibrační odezvou a proveďte měření frekvenčního rozsahu při použití různých typů jednovlákových optických vláken.
4. Dle získaných údajů porovnejte jednotlivé typy vláken, jejich vhodnost pro snímání vibrací a proveďte optimalizaci návrhu.

### Seznam doporučené odborné literatury:

[1] LOPEZ-HIGUERA, Jose Miguel. Handbook of optical fibre sensing technology. New York: Wiley, 2002, xxix, 795 p. ISBN 0471820539.

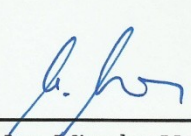
[2] GOODWIN, Eric P a James C WYANT. Field guide to interferometric optical testing. Bellingham, Wash.: SPIE Press, c2006, xii, 100 p. SPIE field guides, FG10. ISBN 9780819465108.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

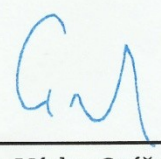
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Zbořil**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 28.04.2017

  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry




  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Ostravě dne: 27. dubna 2017

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala Ing. Ondřeji Zbořilovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce pojednává o rozdílných typech optických vláken a jejich vliv na citlivost Mach-Zehnderova interferometru. Tématem je objasnění vlastností světla, které jsou úzce spojeny s interferometrií. Navazující kapitoly pojednávají o konkrétních interferometrech a objasňují jejich principy funkce a účely ke kterým jsou využívány. Pro praktickou ukázkou byl vybrán Mach-Zehnderův interferometr, který poslouží ke snímání zvukových vibrací.

Praktická část je věnována sestavení prototypu Mach-Zehnderova interferometru a následnému testování vybraných optických vláken. Testování je zakončeno vyhodnocením výsledků jednotlivých měření a následným vyvozením vhodnosti optických vláken pro snímání vibrací.

## **Klíčová slova**

Disperze světla, Optické vlákno, Interference, Koherence, Optovláknový interferometr, Mach-Zehnderův interferometr, Snímání vibrací

## **Abstract**

My Bachelor's thesis subject is about different types of optical fibers and their influence on the sensitivity of Mach-Zehnder interferometer. The main theme is to explain the properties of light, which are connected to Interferometry. Next chapters contain information about specific types of interferometers and clarify their functions and meanings of which they are used to.

For a practical demonstration was chosen Mach-Zehnder interferometer, which purpose is to sense sound frequencies. Practical part shows the construction of Mach-Zehnder interferometer prototype and its testing of selected optical fibers. The testing is finalized by evaluation of results of each single measurement and subsequent conclusion of the suitability of optical fibers for sensing vibrations.

## **Keywords**

Dispersion of light, Optical fiber, Interferometer, Coherence, Optical fiber interferometer, Mach-Zehnder interferometer, Vibrations sensing



# Obsah

|   |        |
|---|--------|
| Seznam použitých symbolů .....                      | - 9 -  |
| Seznam použitých zkratek .....                      | - 10 - |
| Seznam ilustrací a seznam tabulek .....             | - 11 - |
| Úvod.....   | - 12 - |
| 1 Světlo a jeho vlastnosti .....                    | - 13 - |
| 1.1 Odraz a lom světla .....                        | - 13 - |
| 1.1.1 Odraz světla .....                            | - 13 - |
| 1.1.2 Lom světla.....                               | - 13 - |
| 1.2 Disperze světla .....                           | - 13 - |
| 1.2.1 Normální a anomální disperze .....            | - 14 - |
| 1.2.2 Vidová disperze.....                          | - 14 - |
| 1.2.3 Polarizační vidová disperze .....             | - 14 - |
| 1.2.4 Chromatická disperze .....                    | - 14 - |
| 1.3 Ohyb světla.....                                | - 14 - |
| 1.4 Polarizace světla .....                         | - 15 - |
| 2 Optická vlákna .....                              | - 16 - |
| 2.1 Vícevidové vlákno se skokovým indexem .....     | - 16 - |
| 2.2 Jednovidové vlákno se skokovým indexem .....    | - 17 - |
| 2.2.1 Impulzní disperze .....                       | - 18 - |
| 2.3 Gradientní vlákno .....                         | - 18 - |
| 2.4 Polarizaci uchováující jednovidové vlákno ..... | - 18 - |
| 3 Interference a koherence světla .....             | - 20 - |
| 3.1 Interference .....                              | - 20 - |
| 3.2 Koherence .....                                 | - 21 - |
| 3.2.1 Časová koherence.....                         | - 21 - |
| 3.2.2 Prostorová koherence .....                    | - 21 - |
| 4 Interferometry .....                              | - 22 - |
| 4.1 Rozdělení interferometrů .....                  | - 22 - |
| 4.2 Michelsonův interferometr .....                 | - 22 - |
| 4.3 Jaminův interferometr .....                     | - 23 - |
| 4.4 Sagnacův interferometr .....                    | - 24 - |

|       |   |        |
|-------|---|--------|
| 4.5   | Twyman-Greenův interferometr .....                                      | - 25 - |
| 4.6   | Fabryův-Pérotův interferometr .....                                     | - 26 - |
| 5     | Mach-Zehnderův interferometr .....                                      | - 28 - |
| 6     | Sestavení prototypu optovláknového Mach-Zehnderova interferometru ..... | - 30 - |
| 6.1   | Generátor funkcí HAMEG HMF2550 .....                                    | - 30 - |
| 6.2   | Laserový zdroj DFB .....  | - 31 - |
| 6.3   | Coupler .....   | - 31 - |
| 6.4   | Fotodetektor ThorLabs PDA10CS-EC .....                                  | - 31 - |
| 6.5   | Měřicí karta NI USB-6210 .....  | - 31 - |
| 6.6   | LabVIEW .....   | - 31 - |
| 7     | Snímání vibrací Mach-Zehnderovým interferometrem .....                  | - 32 - |
| 7.1   | Snímání pomocí optického vlákna G.657A .....                            | - 32 - |
| 7.1.1 | Verze G.657A .....  | - 33 - |
| 7.1.2 | Verze G.657A jacket .....   | - 34 - |
| 7.1.3 | Verze G.657A strip .....  | - 34 - |
| 7.2   | Snímání pomocí optického vlákna G.652D .....                            | - 35 - |
| 7.2.1 | Verze G.652D .....  | - 35 - |
| 7.2.2 | Verze G.652D jacket .....   | - 36 - |
| 7.2.3 | Verze G.652D strip .....  | - 37 - |
| 8     | Porovnání naměřených dat vzhledem k použitému vláknu .....              | - 38 - |
|       | Závěr .....   | - 39 - |
|       | Použitá literatura .....  | - 40 - |
|       | Seznam příloh .....   | - 42 - |



## Seznam použitých symbolů

| Symbol               | Jednotky | Význam symbolu                           |
|----------------------|----------|--|
| <b>NA</b>            | -        | Numerická apertura                       |
| <b>V</b>             | -        | Normalizovaná frekvence                  |
| <b>a</b>             | -        | Vzdálenost od zdroje světla              |
| <b>n<sub>1</sub></b> | -        | Index lomu jádra vlákna                  |
| <b>n<sub>2</sub></b> | -        | Index lomu pláště vlákna                 |
| <b>s</b>             | -        | Šířka měřená kolmo na směr šíření světla |
| <b>β</b>             | -        | Koherenční šířka                         |
| <b>δ</b>             | -        | Koherenční délka                         |
| <b>θ</b>             | -        | Polovina vrcholového úhlu kužele         |
| <b>λ</b>             | nm       | Vlnová délka                             |
| <b>λ<sub>0</sub></b> | -        | Střední vlnová délka spektrálního oboru  |
| <b>Δλ</b>            | -        | Šířka spektrálního oboru                 |
| <b>π</b>             | 3,14     | Konstanta pí                             |

## Seznam použitých zkratek

| Zkratka          | Význam   |
|------------------|--|
| <b>DFB laser</b> | Distributed feedback laser - Rozprostřená zpětná vazba |
| <b>GI</b>        | Graded Index - Plynulá změna indexu lomu               |
| <b>LSZH</b>      | Low-smoke zero-halogen                                 |
| <b>MMF</b>       | Multimode Fiber - Mnohovidové vlákno                   |
| <b>SI</b>        | Step Index - Skokový index lomu                        |
| <b>ZWP</b>       | Zero Water Peak  |

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

| Číslo ilustrace | Název ilustrace   | Číslo stránky |
|-----------------|---|---------------|
| 2.1             | Vidová disperze v mnohovidovém vlákně                   | 16            |
| 2.2             | Šíření světla v jednovidovém vlákně se skokovým indexem | 17            |
| 2.3             | Šíření světla v gradientním vlákně                      | 18            |
| 4.1             | Michelsonův interferometr                               | 23            |
| 4.2             | Jaminův interferometr                                   | 24            |
| 4.3             | Sagnacův interferometr                                  | 25            |
| 4.4             | Twyman-Greenův interferometr                            | 26            |
| 4.5             | Fabryův-Pérotův interferometr                           | 27            |
| 5.1             | Mach-Zehnderův interferometr                            | 28            |
| 6.1             | Prototyp Mach-Zehnderova interferometru                 | 30            |
| 7.1             | Vlákno v jacket ochraně                                 | 32            |
| 7.2             | Stripované vlákno                                       | 32            |
| 7.3             | Výsledný graf optického vlákna G.657A                   | 33            |
| 7.4             | Výsledný graf optického vlákna G.657A jacket            | 34            |
| 7.5             | Výsledný graf optického vlákna G.657A strip             | 34            |
| 7.6             | Výsledný graf optického vlákna G.652D                   | 35            |
| 7.7             | Výsledný graf optického vlákna G.652D jacket            | 36            |
| 7.8             | Výsledný graf optického vlákna G.652D strip             | 37            |
| 8.1             | Výsledný graf pro všechna optická vlákna                | 38            |

| Číslo tabulky | Název tabulky                | Číslo stránky |
|---------------|------------------------------|---------------|
| 8.1           | Parametry testovaných vláken | 38            |

## Úvod

Tématem bakalářské práce je prakticky dokázat vliv rozdílných typů optických vláken s odlišnými vlastnostmi na citlivost optovláknového Mach-Zehnderova interferometru. Interferometry slouží k měření délek, tlaku, teploty a jiných fyzikálních veličin. Ve zmíněné práci tedy půjde o snímání zvukových vibrací pomocí Mach-Zehnderova interferometru.

Náplní teoretické části je vysvětlení pojmů týkajících se základních vlastností světla s návazností na objasnění potřebných termínů, které slouží k pochopení funkce vláknových interferometrů. První kapitola je věnována vlastnostem světla, následována druhy optických vláken, z nichž některé budou využity v praktické části. Další kapitola se zabývá obecným rozdělením interferometrů, na což navazuje popis daných měřicích systémů.

Praktická část se zabývá sestavením prototypu Mach-Zehnderova interferometru a jednotlivými komponentami, které byly využity.

Obsahem jsou také výsledky testovaných vláken a jejich samotné porovnání mezi sebou. Po samotném porovnání následuje vyhodnocení vhodnosti použití jednotlivých optických vláken pro snímání zvukových vibrací.

# 1 Světlo a jeho vlastnosti

Světlo je elektromagnetické záření, které lze vyjádřit jako elektromagnetické vlnění, jehož vlnové délky viditelné lidským okem se pohybují v rozmezí 390-760 nm. Rychlost světla ve vakuu činí  $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Světlo lze v základu rozdělit na ultrafialové, infračervené a viditelné spektrum.

Infračervené světlo se vlnovou délkou řadí mezi záření, která jsou na vyšších vlnových délkách než ty, které lze zpozorovat pouhým lidským okem, zároveň však na nižších než mikrovlny. Infračervené světlo a již zmíněné mikrovlny jsou odbourávány vodními parami. Naproti tomu ultrafialové světlo je řazeno mezi elektromagnetické záření s nižší vlnovou délkou, která je pod hranicí možnosti zpozorování našim zrakem, tudíž vodní páry zde nemají žádný vliv. Pro zmíněné záření však existuje ozónová vrstva, která je schopna odbourávat nejen ultrafialové světlo, ale dokáže odbourat i veškerá rentgenová záření.

Vlastnostmi světla rozumíme odraz a lom světla, disperzi světla, interferenci světla, polarizaci světla a ohyb (difrakci) světla.[1]

## 1.1 Odraz a lom světla

### 1.1.1 Odraz světla

Odraz světla je vlastností, která se řídí zákony odvozenými pro mechanické vlnění. Tento zákon je nazýván *Huygensův princip*. Pokud světlo dopadá na rozhraní dvou prostředí, která disponují odlišnými optickými vlastnostmi, dochází k odrazu.

Zákon odrazu světla[2]:

*"Velikost úhlu odrazu  $\alpha'$  se rovná velikosti úhlu dopadu  $\alpha$ . Přičemž odražený paprsek zůstává v rovině dopadu. Rovina dopadu je určena dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu."*

### 1.1.2 Lom světla

K lomu světla dochází ve dvou různých variantách. První variantou je lom světla ke kolmici. Tato situace nastává v případě, že světlo přechází z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího. Druhou variantou je lom světla od kolmice, a to v případě, že světlo přechází z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího.

Zákon lomu světla (Snellův zákon) popisuje rovnice 1.1[2]:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.1)$$

## 1.2 Disperze světla

Disperze světla (rozklad světla) úzce souvisí s lomem světla, jelikož právě při lomu světla dochází k oné disperzi. Je to chvíle, kdy se světlo láme a rozkládá na jednotlivé barevné složky. Onen jev je ovlivněn rychlostí světla v závislosti na jeho frekvenci. Poprvé tuto vlastnost objevil Isaac Newton při experimentu se skleněným hranolem. Podstatou pokusu byly dva skleněné hranoly, kdy

první bílé světlo rozložil na spektrum barev a druhý jej opět složil zpět. Samotnou disperzi světla lze také rozdělit na normální a anomální.[3]

### 1.2.1 Normální a anomální disperze

O normální disperzi se hovoří v případě, kdy se vlny s větší vlnovou délkou šíří rychleji, než vlny které mají vlnovou délku kratší. Platí, že grupová rychlost je menší než fázová.

Anomální disperze je přesný opak disperze normální. To znamená, že vlny s větší vlnovou délkou se šíří pomaleji než vlny s kratší vlnovou délkou.

Grupová rychlost udává, jakou rychlostí je v daném směru přenášena energie a musí být vždy nižší než šíření světla ve vakuu.

Naproti tomu fázová rychlost je taková, která popisuje změnu fáze vlny za jednotku času a může dosahovat vyšších rychlostí, než je rychlost světla ve vakuu.[3]

### 1.2.2 Vidová disperze

Vidová disperze vzniká v případě, že se vláknem šíří vícero vidů. Každý z vidů urazí stejnou dráhu za rozdílnou dobu, čímž vzniká zkreslení přijímané informace.

### 1.2.3 Polarizační vidová disperze

Polarizační vidová disperze je zapříčiněna anizotropními vlastnostmi vlákna. Index lomu v průřezu vlákna není stejný, tedy je nějakým způsobem zdeformován. Pokud je vlákno takto zdeformováno, obě polarizační roviny vidu prochází rozdílnou délkou tras. Zdeformování vlákna může být způsobeno nedokonalostmi, mechanickým namáháním či špatnou montáží. Na tyto nedostatky je třeba dbát zejména při přenosu signálu na větší vzdálenosti, jelikož zde mají právě největší vliv na přenosovou rychlost.[5]

### 1.2.4 Chromatická disperze

Chromatická disperze se vyskytuje v jednovidových vláknech. Je způsobena různými spektrálními složkami na odlišných vlnových délkách, které se šíří optickým vláknem rozdílnou rychlostí. Dojde k roztažení impulsu, a tím k zasažení do impulsů sousedních. Ve výsledku dojde ke zkreslení přijímané informace.

Chromatická disperze se skládá z disperze materiálové a vlnovodné.[6]

## 1.3 Ohyb světla

Ohyb (difrakce) světla je vlastnost, která se objevuje ve spojitosti s interferencí světla. Interference světla popisuje šíření světla, které je vyzařováno skrz štěrbinu, přičemž po jejím průchodu přechází v šíření do prostoru. Na stínítku které je umístěno dále za štěrbinou, je možné pozorovat, jak světlo tvoří světlé a tmavé pruhy. Difrakce tedy vzniká, pokud v šíření světla za štěrbinou brání překážka. Světlo se v okamžiku střetu ohne a prochází částečně i do prostoru za překážkou. Běžně světlo po střetu s překážkou neprojde do geometrického stínu překážky, avšak difrakce nám popisuje jev, který onen stav umožňuje.[7]

## 1.4 Polarizace světla

Pro pochopení základů polarizace světla je nutné znát jeho skladbu. Tvoří jej totiž složka elektrická a magnetická. Elektrickou složku tvoří elektrické pole, které dokáže kmitat v jakékoliv rovině. Pokud je toto kmitání nějakým způsobem ovlivněno či omezeno, pak se z tohoto světla stává polarizované světlo. Omezit kmitání lze hned několika způsoby. První způsob je odraz světla. Při dopadu světla na prostředí se paprsek odrazí pod určitým úhlem. Odražený paprsek je tímto částečně polarizovaný. Elektrické pole odraženého paprsku bude kmitat kolmo na rovinu, kam paprsek dopadl, což je zároveň i důkazem o částečné polarizaci. Druhý způsob se zabývá polarizací lomem. Princip je velice obdobný jako u polarizace odrazem. Místo odrazu od prostředí se však paprsek zlomí a pokračuje dál do druhého prostředí a je opět částečně polarizován jako v předchozím případě. Třetí možností je polarizace dvojlomem. Princip polarizování opět navazuje na předcházející způsoby avšak s několika odlišnostmi. Paprsek se v tomto případě totiž polarizuje úplně a dochází k tomu ve chvíli, kdy paprsek dopadne na anizotropní látku, u které závisí, v jakém směru dopadá. Rychlost světla ovlivní směr jeho šíření, z čehož vyplývá, že pokud nepolarizovaný paprsek dopadne na zmíněný materiál, rozdvojí se, a právě onen jev se nazývá dvojlom. Poslední možností je polarizace polaroidem. Způsob spočívá ve speciálně navrženém filtru, díky němuž lze získat polarizované světlo. Filtr částečně propustí paprsek v jeho kolmém směru.[8]



## 2 Optická vlákna

### 2.1 Vícevidové vlákno se skokovým indexem

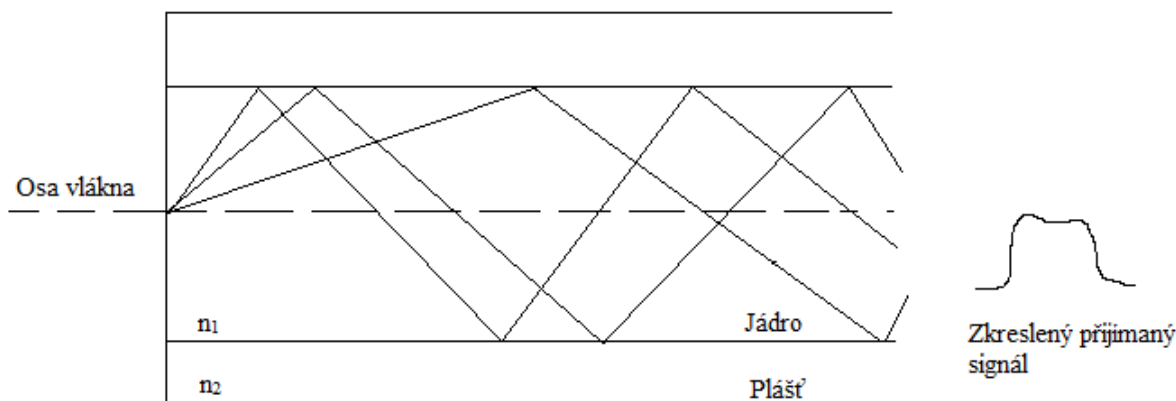
Vícevidové neboli MM (multimode) vlákna jsou velice často vyrobené z polymerů. Vlnové délky mívají typicky 800-1300 nm. Vláknem se skládá z jádra, pláště, primární a případně dalších ochranných vrstev. Jádro vlákna mívá obvykle průměr 50 či 62,5  $\mu\text{m}$  a plášť 125  $\mu\text{m}$ . Průměr primární ochrany nabývá hodnoty 250  $\mu\text{m}$ , pokud však jde o ochranu sekundární, ta se pohybuje v rozmezí 400-900  $\mu\text{m}$ .

Vícevidová vlákna se vyznačují především jednoduchostí na výrobu, jednoduchou manipulací a možností snadného spojování. Významnou vlastností MM vláken je snadná vazba světla. Směrodatnou veličinou je pak *numerická apertura*, kterou lze vypočítat pomocí vztahu 2.1:

$$NA = \sin \theta_c \quad (2.1)$$

MM vlákna nejsou bezchybná. Mezi nevýhody patří především výskyt vidové disperze, se kterou souvisí nízká přenosová rychlost. MM vlákna je tedy možné použít pouze na přenosy kratších vzdáleností.

Módová disperze je zapříčiněna navázáním více vidů do vlákna, jak lze vidět na obrázku 2.1. Každý z jednotlivých módů (vidů) se vláknem šíří pod odlišným úhlem, což má za následek jejich časový rozdíl. Vidy, které se šíří pod určitým úhlem vůči ose vlákna, mají nižší rychlost a jejich dráha šíření je delší.[9]



Obrázek 2.1: Výskyt vidové disperze v mnohovidovém vlákně

## 2.2 Jednovidové vlákno se skokovým indexem

Jednovidová vlákna slouží k šíření pouze jediného vidu, který je šířen podél osy jádra vlákna, jak je znázorněno na obrázku 2.2. Jádro jednovidových vláken má velmi malý průměr. Jeho běžná velikost je 8-10  $\mu\text{m}$ . Nevýhodou je to, že vlákna jsou finančně náročná na výrobu, ale na druhou stranu mají vyšší dosah, malý útlum a není zde přítomna vidová disperze.

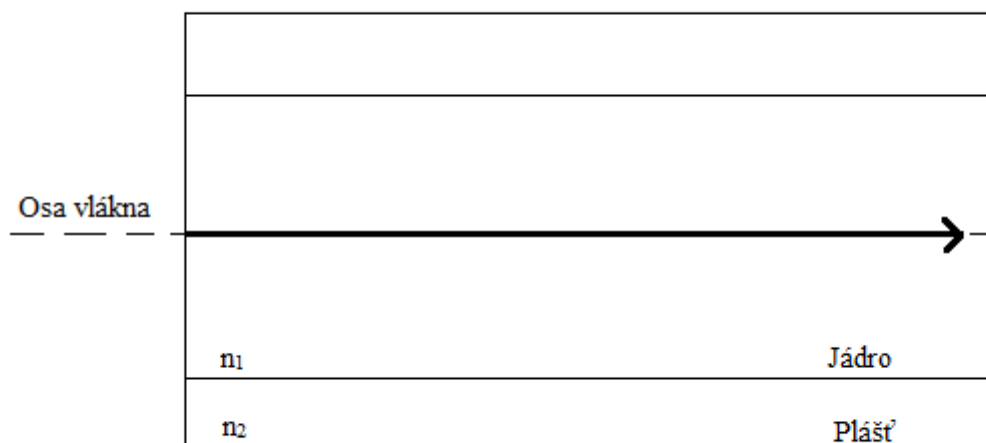
Aby bylo možné o vláknu říci, že je jednovidové, musí platit vztah 2.2.

$$V \leq 2,405 \quad (2.2)$$

*Normalizovaná frekvence* udává, zda je vlákno jednovidové či vícevidové. Vztah pro výpočet vyplývá z rovnice 2.3.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \cdot \text{NA} \quad (2.3)$$

kde  $a$  je průměr jádra vlákna. Normalizovaná frekvence zohledňuje kmitočet, velikost vlákna a materiál, který je na vlákno použit. Při jejím navyšování se můžou další vidy šířit vláknem.[9]



Obrázek 2.2: Šíření světla v jednovidovém vlákně se skokovým indexem

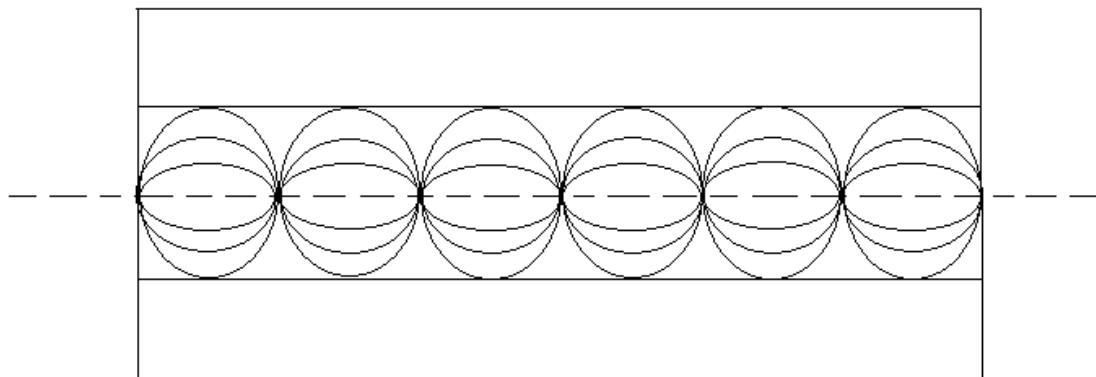
### 2.2.1 Impulzní disperze

Čas přenosu optického signálu v jednovidovém vlákně je závislý na vlnové délce. Materiálová disperze vyplývá v zásadě z toho, že index lomu se mění s vlnovou délkou. Různé vlnové délky světla se v jednovidových vláknech šíří odlišnou rychlostí. Světlo o vyšších vlnových délkách zasahuje dále do pláště, protože světlo na delších vlnových délkách je na nižším indexu efektivněji snímáno. [9]

## 2.3 Gradientní vlákno

Gradientní vlákno se řadí mezi vlákna mnohovidová, konkrétně mezi mnohovidová vlákna s gradientním průběhem indexu lomu (MMF GI) vyobrazeného na ilustraci 2.3. Mimo jiné existují i mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu (MMF SI). Charakteristickou vlastností pro gradientní vlákno je závislost indexu lomu jádra na jeho poloměr. Index lomu se směrem od osy jádra vlákna mění směrem dolů. Vlákna jsou vyráběna za účelem snížení módové disperze. Pro docílení je nutné, aby vyšší módy měly (pokud je to možné) stejnou konstantu šíření osovým módem, což je provedeno klesáním indexu lomu směrem od osy jádra vlákna k plášti.

Se snížením počtu vidů ve vlákně je možné také měnit index v oblasti jádra vlákna. V tomto způsobu se vlákno chová jako řada čoček, které usměrňují světelný paprsek periodicky, zatímco prochází vláknem. Technika může být použita ke snížení vysokého počtu vidů šířících se typickým mnohovidovým vláknem se skokovým indexem z přibližně 10 000 na 300 vidů pro typické gradientní vlákno. [9]



Obrázek 2.3: Šíření světla v gradientním vlákně

## 2.4 Polarizaci uchovávající jednovidové vlákno

Není pravdou, že jednovidové vlákno je zcela jednovidové, neboť se jedná o dva vidy s pozměněnou polarizací a s možností šíření ve vlákně. Aby se ona změna odstranila, bylo vytvořeno

několik jednovidových vláken, které jsou uzpůsobeny tomu, aby skrze ně směřoval jen jeden lineární polarizační stav. Je několik způsobů jak vyrobit toto vlákno a uchovat polarizaci. Nejjednodušší metodou je vyrobit vlákno s eliptickým jádrem extrémně malých rozměrů. Pokud budeme mít dostatečně velký rozdílný index mezi jádrem a pláštěm, tak světlo vypuštěné s lineární polarizací zarovnané podél hlavní osy bude uchováno v jejím polarizačním stavu. Potřebujeme však malý průměr jádra, který velmi ztěžuje spouštění a spojování mezi optickými elementy. Je zde taky velký rozdíl indexu lomu mezi jádrem a pláštěm, což zapříčiňuje složité vyrábění nízkoztrátového vlákna. Abychom obešli tyto problémy, tak několik skupin vyvinulo vlákna s vestavěným napětím. Napětí způsobuje, že rozdílný index lomu (společně s hlavní a vedlejší osou a světlem spuštěným podél hlavní osy) si ponechá svůj polarizační stav.

Je taky možné vyrobit vlákno, které směřuje světlo s jedním polarizačním stavem. Toto vlákno je vyrobeno tak, aby nežádaná polarizace měla větší propustnost než polarizace, která by měla procházet. Nazývá se *polarizační vlákno* a je využíván zejména v typech vlákenných optických senzorů, které spoléhají na kontrolu polarizačního stavu v systému.

Jak bylo řečeno výše, polarizace v optických vláknech vzniká buďto z napětí, nebo z dvojlomu. Napětí je indukované ve vlákne díky přidání vysoce expanzivních tyčí do předlisku a následného vykreslení do vlákna.

Forma dvojlomu ve vláknech vzniká z nekruhových symetrických indexních variací. Například šíření v eliptickém jádru vlákna závisí na vstupní polarizaci. Typické hodnoty pro dvojlom napětí jsou několik centimetrů.[9]

## 3 Interference a koherence světla

### 3.1 Interference

Interference světla je důkazem, že světlo je vlněním. První zmínka o tomto tématu padla v 17. století, kdy vědec Christiaan Huygens vydal knihu *Pojednání o světle*, ve které se zabýval vlnovou teorií světla. Vlnová teorie však zůstala nepovšimnuta až do doby objevu interference světla. Když Huygens zveřejnil své poznatky, byl v popředí slavný vědec Isaac Newton, jehož teorie byla odlišná. Vědci však byla uznávána Newtonova teorie, která měla prokázat, že světlo je tvořeno malými částicemi. Během života se Newton dostal do ostrého sporu s vědcem Robertem Hookem, který se snažil (neúspěšně) prosadit vlnovou teorii, jejímž autorem byl Huygens (sám byl objevitelem difrakce). Právě s rokem 1801 přišel Youngův (dvojštěrbinový) pokus, při kterém se snažil prokázat, že vlnová teorie týkající se světla je pravdivá. Veřejnost se mu však přesvědčit nepodařilo. O pár let později nastala změna ve vnímání světla, o kterou se zasloužil Augustin Fresner. Přesvědčil totiž veřejnost i zastánce Newtonovy teorie a docílil toho použitím diferenciálního výpočtu, jenž vysvětluje difrakci. Ve chvíli kdy byli již všichni přesvědčeni o pravdě, přichází se svými vědomostmi Albert Einstein s popisem fotoelektrického jevu, z něhož lze vyvodit závěr, který splňuje jak teorii částicovou, tak i teorii vlnovou.[10]

Youngův pokus byl prvním důkazem existence interference světla. S použitím monochromatického záření pronikajícího první štěrbinou se světlo začne šířit prostorem, ve kterém byly dále umístěny dvě štěrbin, po jejichž průchodu byl paprsek rozdělen na dva další, které se za štěrbinou kryly. V okamžiku krytí se na stínítku umístěného v prostoru za průchodem dvojštěrbinou vytvořila interference světla. Jedná se o sérii světlých a tmavých proužků. Aby tyto proužky mohly vzniknout, je třeba splnit několik podmínek. Všechna záření, která se na stínítku setkají v jediném bodě, musejí mít stejnou vlnovou délku a zároveň je nutné, aby měla stálý s časem neměnný dráhový rozdíl. Toto záření lze nazvat *koherentním zářením*. Příkladem zmíněného záření je třeba laser.

Existuje také příklad interference světla, jestliže jej necháme odrážet od velmi tenkého materiálu. Materiálem může být mýdlová bublina. Dopadá-li světlo pod určitým úhlem na povrch mýdlové bubliny, tak se část světla odráží a část projde. Daná část světla, která projde do bubliny a dostane se na její druhý konec, je momentem, kdy nastane totožný jev jako na začátku. Opět se část již proniklého světla do bubliny částečně odráží a z části projde ven. Paprsek, který se tímto způsobem odráží, bude zacyklen. Interferenci lze zde pozorovat na straně odrazové nebo propustné. Onen druh interference jde využít při opracovávání rovinných či kulových ploch nebo také k měření vlnové délky světla. S tímto využitím úzce souvisí pojem *Newtonovo sklo*, což je speciální sklo deskového tvaru obsahující ploskovypouklou čočku, jejíž poloměr křivosti je značný. Sklo se zejména využívá k výrobě antireflexních vrstev pro čočky fotoaparátů či kamer. Antireflexní vrstva má za následek omezení ztrát světla způsobenou odrazy.[10]

## 3.2 Koherence

Jev zvaný koherence je úzce spojen s kvalitou interference. Touto kvalitou je pojem zvaný *viditelnost*. Pokud by nebylo docíleno koherence, nelze vnímat interferenční jevy založené na principu superpozice.

Koherence je popsána jako souvislost mezi dvěma a více vlnami světla. Projevuje se při skládání vln, která mohou být odlišná např. vlnovou délkou, amplitudou, fází či směrem šíření. Pozorování zásadních interferenčních jevů je možné tehdy, když nastává interference koherentních vln, které se vyznačují stejnou vlnovou délkou, frekvencí, směrem kmitání, šíří se stejnou rychlostí a jejich fázový rozdíl je konstantní. Koherenci lze dále rozdělit na koherenci časovou a prostorovou.[11]

### 3.2.1 Časová koherence

Časová koherence je popsána jako schopnost vlny interferovat sama se sebou v různých časech. Stupeň časové koherence je charakterizován tzv. koherenční délkou  $\delta$  pro níž platí vztah 3.1.

$$\delta = \lambda_0 \cdot \left(\frac{\lambda_0}{\Delta\lambda}\right) \quad (3.1)$$

Kde je  $\lambda_0$  střední vlnová délka spektrálního oboru a  $\Delta\lambda$  je jeho šířka. Dva paprsky jsou časově koherentní, když rozdíl jejich optických drah  $\Delta$  bude menší než  $\delta$ . [12]

### 3.2.2 Prostorová koherence

Naproti tomu prostorová koherence je charakterizována tzv. koherenční šířkou  $\beta$  pro kterou platí vztah 3.2.

$$\beta = \lambda_0 \cdot \left(\frac{a}{s}\right) \quad (3.2)$$

Kde  $a$  je vzdálenost od zdroje světla a  $s$  je jeho šířka měřená kolmo na směr šíření světla. Dva paprsky jsou koherentní, jestliže vzdálenost mezi nimi je menší než  $\beta$ . [12]

## 4 Interferometry

Obecně si lze interferometry vyložit jako velmi přesná měřidla. Existuje několik druhů interferometrů, mezi kterými jsou jisté odlišnosti.

### 4.1 Rozdělení interferometrů

Jedno z kritérií, podle kterého lze interferometry rozdělit je počet interferujících vln. Jsou to interferometry dvousvazkové a vícesvazkové. Mezi dvousvazkové interferometry lze zařadit Michelsonův, Mach-Zehnderův a Sagnacův. Nejznámějším vícesvazkovým interferometrem je Fabry-Perotův.

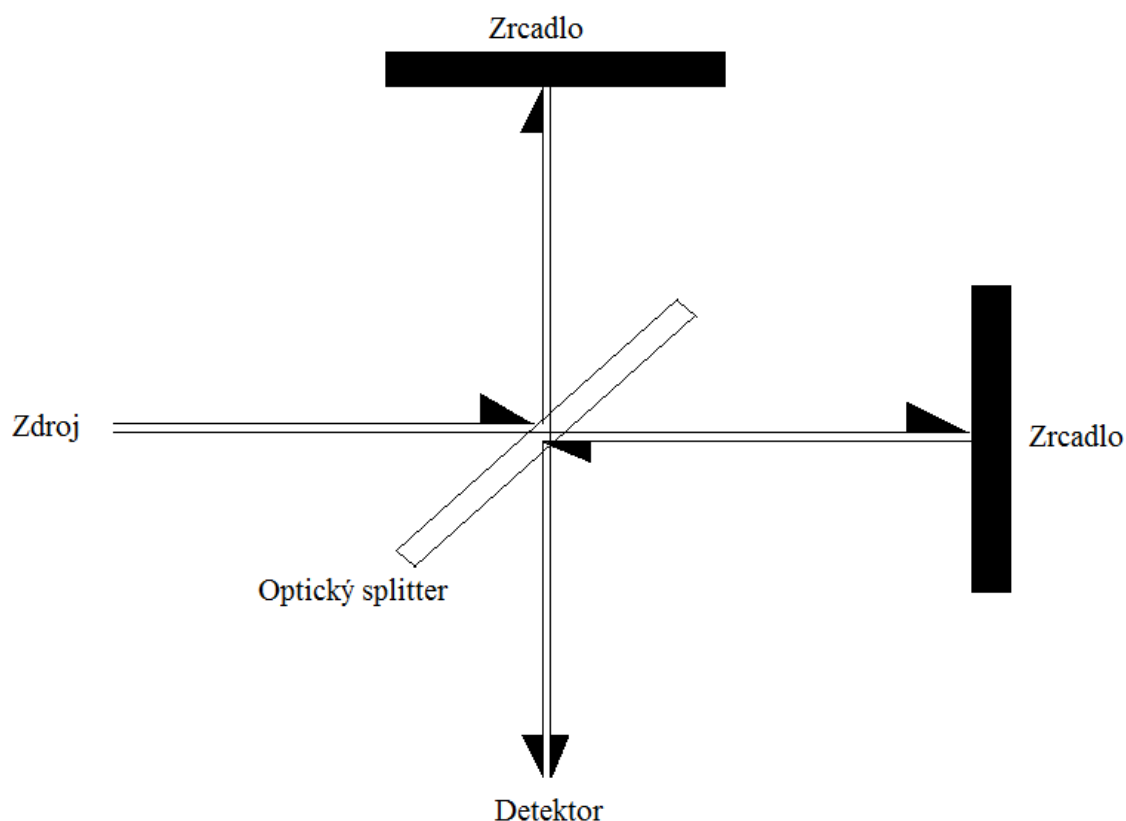
Dále můžeme rozdělit interferometry podle jejich účelu. Existují interferometry sestavené k měření délek a jsou nazývány interferenčními komparátory. K měření tlaku, teploty plynů či plazmatu, nebo určení indexů lomu plynů a kapalin slouží interferenční refraktometry. Poslední skupinu tvoří interferenční spektroskopy, které dokážou určit strukturu spektrálních čar například k detekci gravitačních vln.

### 4.2 Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr byl vynalezen Albertem Abrahamem Michelsonem. Michelson se ve svém životě zabýval fyzikální optikou a je také držitelem Nobelovy ceny za fyziku. Svůj život zasvětil výzkumu, ve kterém srovnával rychlosti světla v závislosti směru (vzhledem k Zemi). Podle naměřených hodnot dospěl k závěru, že světlo má konstantní rychlost, která není ovlivněna měnícím se směrem. Zmíněný objev je také znám jako *Michelsonův pokus*. K pokusu sestrojil právě interferometr a prováděl pomocí něj i další významné experimenty.

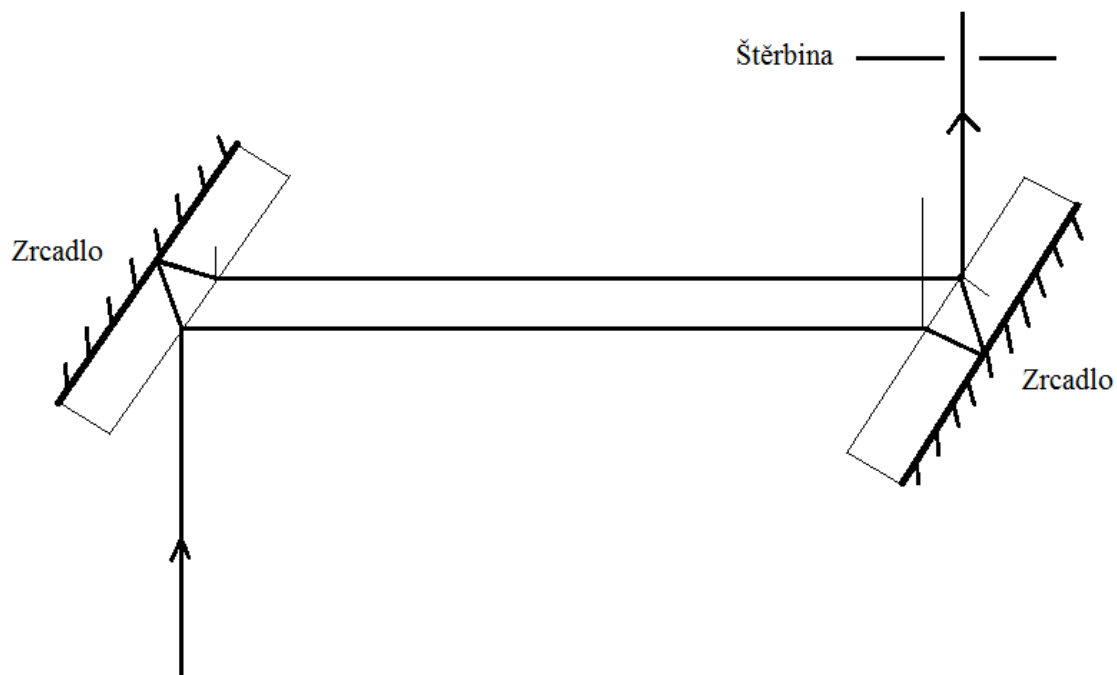
Michelsonův interferometr se skládá z několika komponentů, jimiž jsou polopropustné skleněné destičky, kompenzační destičky, dvou zrcadel, dalekohledu a v neposlední řadě je nutný zdroj světelných paprsků. Jednoduché schéma je předvedeno na obrázku 4.1. Samotná činnost interferometru je následovná. Zdrojový paprsek světla, při dopadu na polopropustnou skleněnou destičku, je rozdělen a každá z jeho částí putuje do jiného bodu. Zatímco první paprsek se odráží od polopropustné destičky, druhý skrze ní prochází. Od tohoto bodu putují paprsky svou vlastní cestou. Oba se odrážejí kolmo od zrcadel, odkud se vrací zpět do bodu, ve kterém se rozdvojily a teprve poté se odrazí do dalekohledu. Interferometr je možné použít například při měření vlnových délek světla.[13]



Obrázek 4.1: *Michelsonův interferometr*

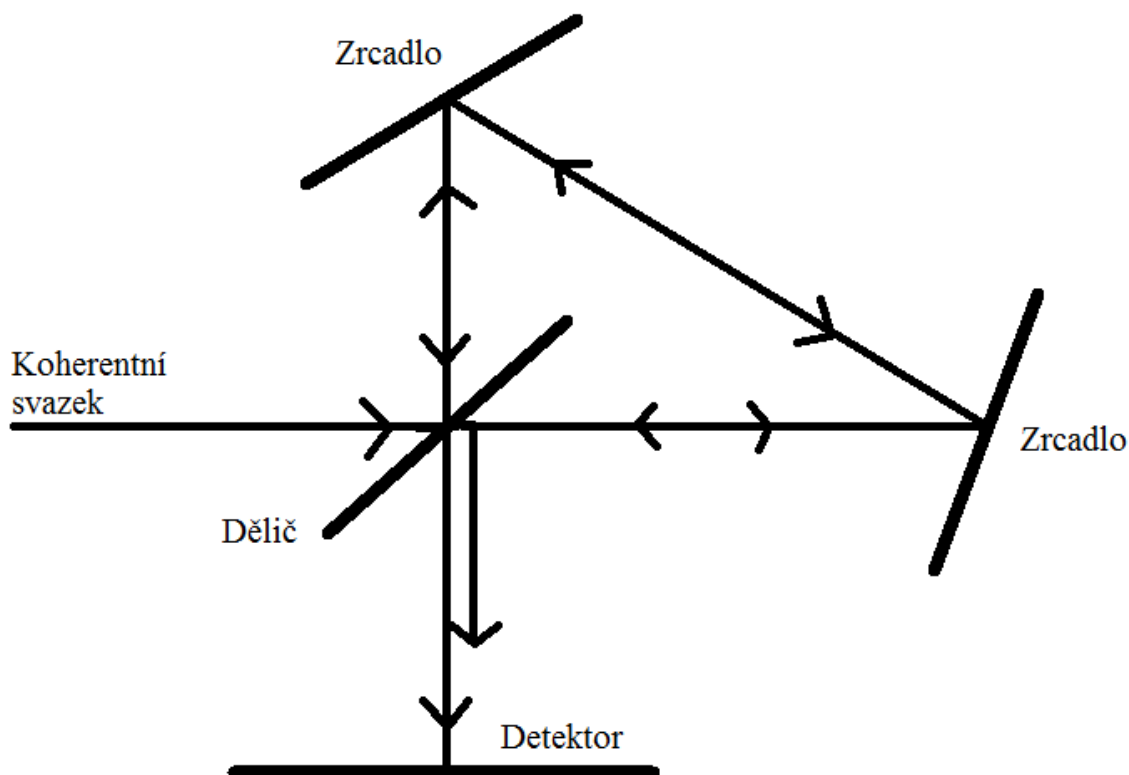
### 4.3 Jaminův interferometr

Jaminův interferometr byl vynalezen v 19. století francouzským fyzikem Jaminem Julesem-Célestinem. Jeho práce zahrnovala zkoumání polarizace světla, indexů lomu a rychlosti světla. Na rozdíl od Michelsonova interferometru je způsob, jakým Jaminův interferometr funguje poněkud složitější. Vyslaný světelný paprsek je nejprve pozměněn čočkami v paralelní svazek. Ten se následně v planparalelní dělicí destičce rozdvíjí na část předmětovou a referenční, přičemž každá putuje zvlášť. Předmětová část je při průchodu deformována. Po této fázi jsou opět oba paprsky pomocí dělicí destičky spojeny. Optické dráhy paprsků byly před opětovným propojením odlišné a to se při opětovném spojení projevilo vznikem interference. Onen princip interferometru je možné využít pro měření indexu lomu plynů právě díky sledování interferenci při spojení optických svazků. Schéma Jaminova interferometru je vyobrazeno na obrázku 4.2.[14]

Obrázek 4.2: *Jaminův interferometr*

#### 4.4 Sagnacův interferometr

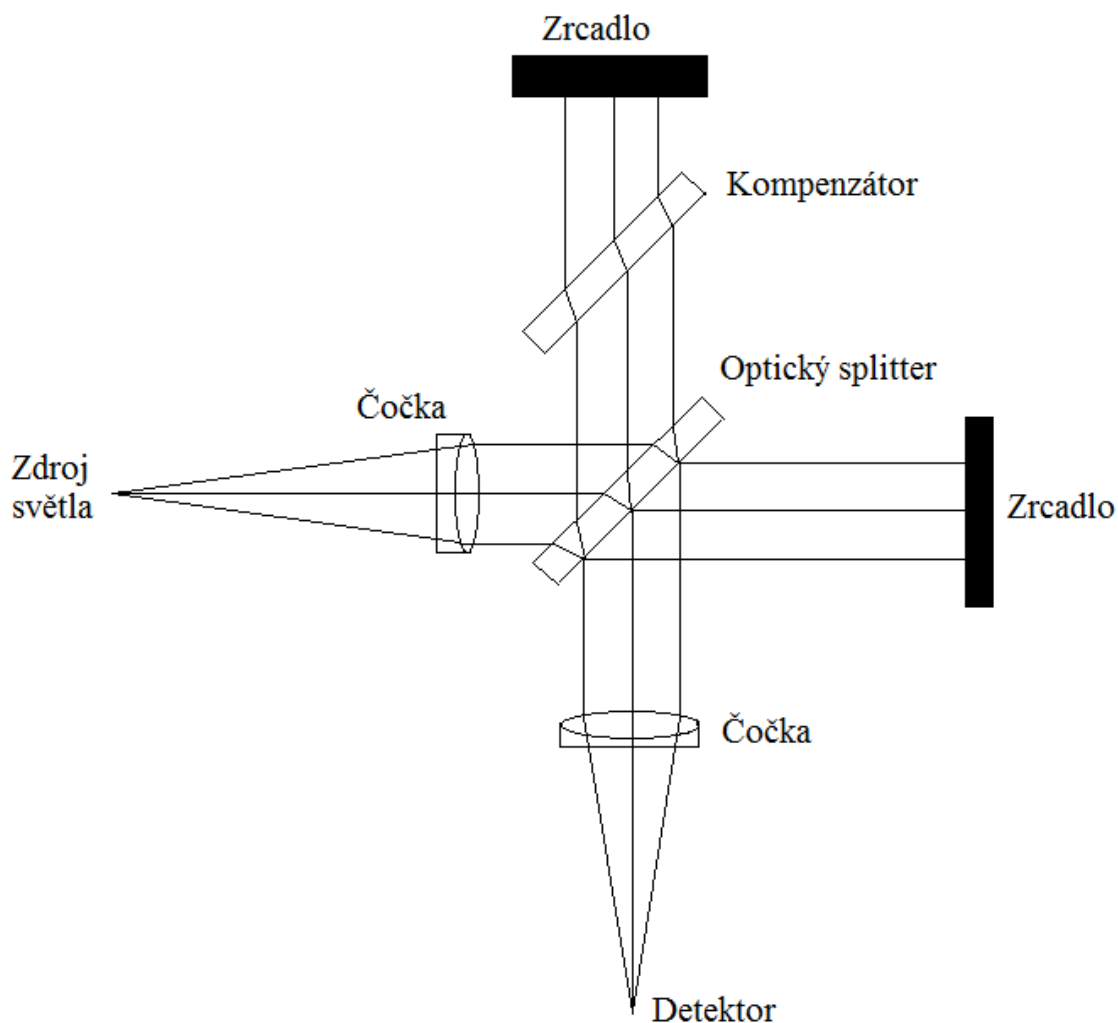
Sagnacův interferometr byl vynalezen na počátku 20. století francouzským fyzikem Georgesem Sagnacem. V konstrukci interferometru se nachází cívka jednomodového vlákna, zrcadla a polopropustné destičky, jak je možné vidět na obrázku 4.3. Světelný paprsek se na polopropustných destičkách rozdělí tak, aby jeden z nich procházel skrz a druhý se pouze odrazil. Poté se tyto paprsky odrazí od zrcadel. Každý z paprsků se odráží v opačném směru než ten druhý, což má za následek shodu drah obou paprsků. Pokud se cívka otáčí, dojde ke vzniku dráhových rozdílů. Onen princip je hlavním důvodem, proč je Sagnacův interferometr využíván jako důležitá komponenta navigačních systémů.[15]



Obrázek 4.3: Sagnacův interferometr

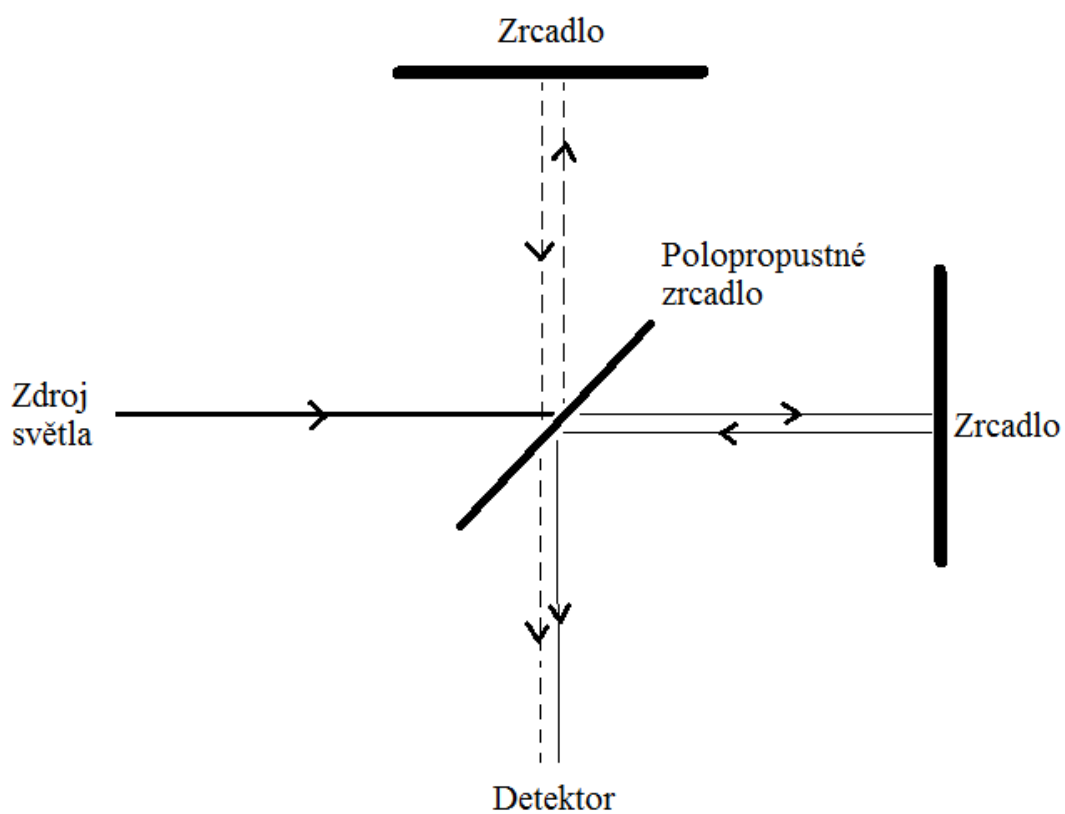
#### 4.5 Twyman-Greenův interferometr

Twyman-Greenův interferometr byl vynalezen roku 1916 Frankem Twymanem a Arthurem Greenem a je variantou Michelsonova interferometru. Hlavním rozdílem je nutnost použití bodového zdroje světla (laseru). Michelsonův interferometr dovoluje použití laseru také, avšak může být použit i jiný zdroj záření. Twyman-Greenův interferometr má výborné využití při kontrole optických vad. V praktickém provedení poslouží jako příklad dané komponenty čočka. Zkontrolovat výskyt vady lze umístěním čočky do trajektorie jednoho paprsku a případné vyskytlé vady se promítnou na interferenčním obrazci. Ilustraci schématu Twyman-Greenova interferometru lze vidět na obrázku 4.4.[16]

Obrázek 4.4: *Twyman-Greenův interferometr*

#### 4.6 Fabryův-Pérotův interferometr

Fabry-Pérotův interferometr byl vynalezen Charlesem Fabrym a Alfredem Pérotem. Pracuje na principu Mach-Zehnderova interferometru. Rozdílem těchto dvou interferometrů je přidání rezonátoru s polopropustnými zrcadly, jak je vidět na obrázku 4.5, což má za následek vícenásobný průchod světelného svazku transparentním objektem. Transparentním objektem rozumíme prostor, který umožňuje záření projít. Fabryův-Pérotův interferometr se řadí svou citlivostí na jeden z nejvýkonnějších interferometrů pro zkoumání transparentních objektů. Vysoká citlivost je docílena zmíněnými mnohonásobnými průchody, ale má i svou nevýhodu. Čím vícekrát totiž světelný svazek prochází průchody, tím nižší je přesnost měření. [17]

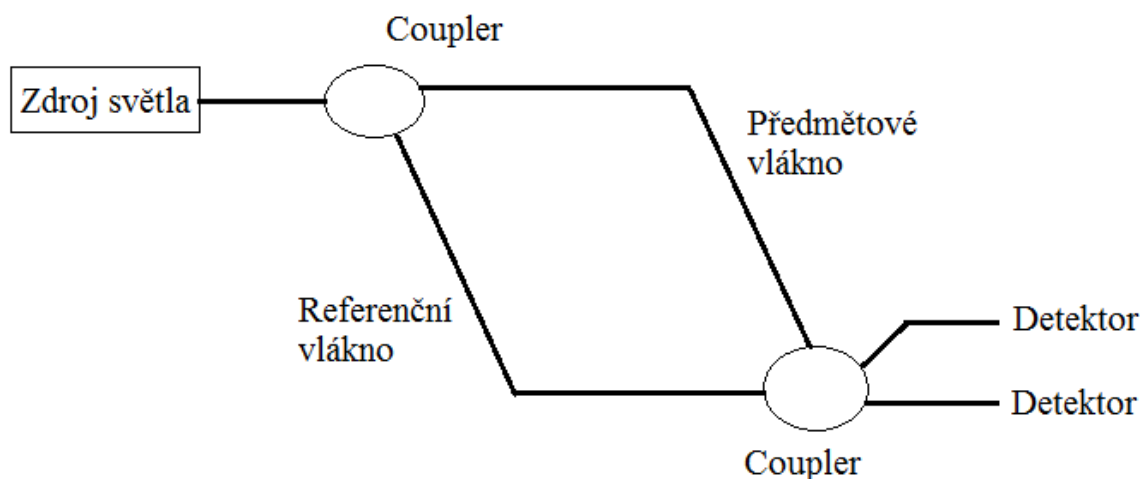


Obrázek 4.5: *Fabryův-Pérotův interferometr*

## 5 Mach-Zehnderův interferometr

Mach-Zehnderův interferometr byl vyvinut v letech 1891 až 1892. Zasloužili se o to Ernest Mach a jeho kolega Ludwig Zehnder. Přístroj lze využít k přesným měřením transparentních objektů.

Jedná se o základní typ interferometrové konfigurace, který je znázorněn na obrázku 5.1. Zdroj je spojený do jednomódového vlákna elektrického kabelu a je rozdělen pomocí amplitudy do dvou ramen vlákna, které mohou být brány jako signální paprsek a referenční paprsek. Měřená veličina pak modifikuje fázi signálního paprsku a tím pádem je referenční paprsek v konstantním prostředí. Tyto dva paprsky se poté překombinují na druhém směrovači dál do fotodetektoru, který pouští výboj do elektrického výstupu.[18]



Obrázek 5.1: Mach-Zehnderův interferometr

Viditelnost rušení závisí na jejich relativních stavech polarizace, vzájemné koherenci, intenzitě signálu a referenci paprsku. V optimálním případě se relativní intenzity a stavy polarizace rovnají a zároveň jsou rozdíly délek optických drah mezi signálem a referenční paprsků mnohem menší než délka koherence zachyceného světla. Podstatou pro používání jednomódových optických vláken je dobrá prostorová koherence. S těmito optimálními podmínkami je viditelnost jednotná. V praxi může viditelnost nabývat hodnoty mezi nulou a jedničkou. Znamená to, že jsou tyto dva výstupy v protifázi, takže součet výstupů je konstantní bez ohledu na relativní fázi. Přístup ke dvěma výstupům může být použit pro kompenzování efektu při změně intenzity zdroje.

Relativní intenzita dvou paprsků závisí na spojení koeficientů v použitém směrovém rozbočovači, který byl vyroben pro dané dva spojované typy. Relativní stav polarizace závisí na dvojlomu vláken a spojek. Celý interferometr lze sestavit z vysoce dvojlomných vláken a

komponentů, čímž je možné pracovat se stabilním stavem polarizace. Ve většině případů jsou však interferometry zkonstruovány z normálních válcových symetrických vláken.[19]



## 6 Sestavení prototypu optovláknového Mach-Zehnderova interferometru

Pro uskutečnění praktické části bylo zvoleno sestrojení prototypu optovláknového Mach-Zehnderova interferometru, který je znázorněn na obrázku 6.1. Část sestavy složené ze zdroje záření, coupleru, referenčního vlákna a třech detektorů byla umístěna na kovové desce podložené pěnou z důvodu izolace před nežádoucími vlivy. Následovala část snímaného vlákna umístěného v reproduktoru, který byl podložen polystyrenem. Dalšími součástmi sestavy byl (generátor frekvencí), měřicí karta a notebook s programem LabVIEW.



Obrázek 6.1: Prototyp Mach-Zehnderova interferometru

### 6.1 Generátor funkcí HAMEG HMF2550

Generátor funkcí jak již název napovídá, slouží ke generování různých funkcí. V případě této praktické části sloužil jako generátor frekvencí, které následně přehrával reproduktor.

Parametry generátoru funkcí HAMEG HMG2550[20]:

- Rozsah frekvencí: 20μHz až 25/50 MHz

- Modulační módy: AM, FM, PM, PWM, FSK
- Výstupní napětí: 5mV<sub>pp</sub> až 10V<sub>pp</sub>
- Rozlišení: 14 bit
- Signály: sinusový, obdélníkový, trojúhelníkový, impulsní, rampa a standardní křivky (bílý šum a podobně)

## 6.2 Laserový zdroj DFB

Jako zdroj záření byl použit DFB laser, který je typický tím, že velmi těsně u aktivní vrstvy se nachází rovnou v materiálu naleptaná difrakční mřížka. Difrakční mřížka plní funkci optického rezonátoru, ale zároveň funguje i jako optický spektrální filtr. Tento laser pracoval na vlnové délce 1580 nm a výkon byl řízen manuálně.[21]

## 6.3 Coupler

Coupler je pasivní optický prvek a slouží k rozdělení optického výkonu do vícera optických vláken. Coupler, který byl využit se skládá z coupleru 2x2 a 3x3.[22]

## 6.4 Fotodetektor ThorLabs PDA10CS-EC

Fotodetektor je optoelektronickou součástí, jejíž elektrické vlastnosti se mění při dopadu světla.

Parametry fotodetektoru ThorLabs PDA20H-EC[23]:

- Rozsah vlnových délek: 0,9 - 1,7  $\mu\text{m}$
- Maximální šířka pásma: 12 kHz - 17 MHz
- Zářivý výkon: 1,25 - 60 pWHz<sup>1/2</sup>

## 6.5 Měřicí karta NI USB-6210

Měřicí karta je využívána ke sbírání dat, která mohou být dále zpracována pomocí počítače.

Parametry NI USB-6210[24]:

- 16 analogových kanálů
- A/D převodník: rozlišení 16-bit
- vzorkovací frekvence: 250 kS/s
- převod dat za pomoci USB, programovaného I/O jednotka
- 4 vstupy a 4 výstupy

## 6.6 LabVIEW

Naměřená data byla zpracována na notebooku za pomoci programu LabVIEW. Byla využita aplikace Signal Analyzer. Tato aplikace zpracovávala data ze tří námi použitých detektorů a řešila fázový posun mezi jimi samotnými.

## 7 Snímání vibrací Mach-Zehnderovým interferometrem

Pro snímání vibrací byly použity dva typy optických vláken ve třech různých variantách. Varianty se od sebe odlišovaly množstvím ochranných vrstev.

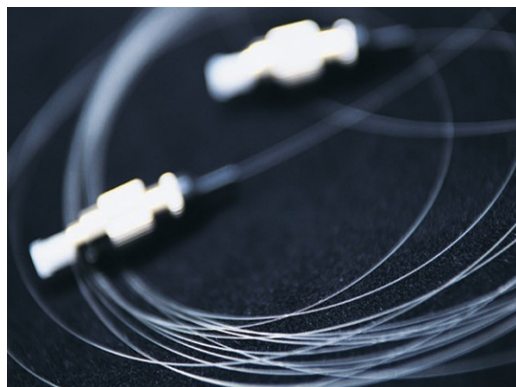
Prvním typem bylo optického vlákno G.657A, které disponuje nižší úrovní útlumu způsobeného ohnutím a je kompatibilní s vláknem G.652. Dalším využitým typem je optické vlákno G.652D, které je využíváno v rozsahu vlnových oblastí 1310 nm a 1550 nm. Mimo jiné vlákno G.652 existuje také ve variantách A,B a C, avšak varianta D je v dnešní době nejoblíbenější. Svými vlastnostmi je vhodné pro 10 Gb a 40 Gb systémy.[25]

### 7.1 Snímání pomocí optického vlákna G.657A

Každé z variant optického vlákna G.657A bylo testováno deseti náměry po sedmnácti frekvencích. Poté byly všechny náměry na daných frekvencích zprůměrovány. Následující grafy 7.3 až 7.5 znázorňují průměr ze všech náměrů pro jednotlivé frekvence vlákna G.657A, G.657A jacket a G.657A strip. Vlákno G.657A jacket disponuje ochrannou vrstvou LSZH, která slouží k ochraně proti chemikáliím, kapalinám a erozi. V případě jednovidových vláken má žlutou barvu. Oproti tomu vlákno G.652D strip je vybaveno pouze primární ochranou s průměrem 250  $\mu\text{m}$ .



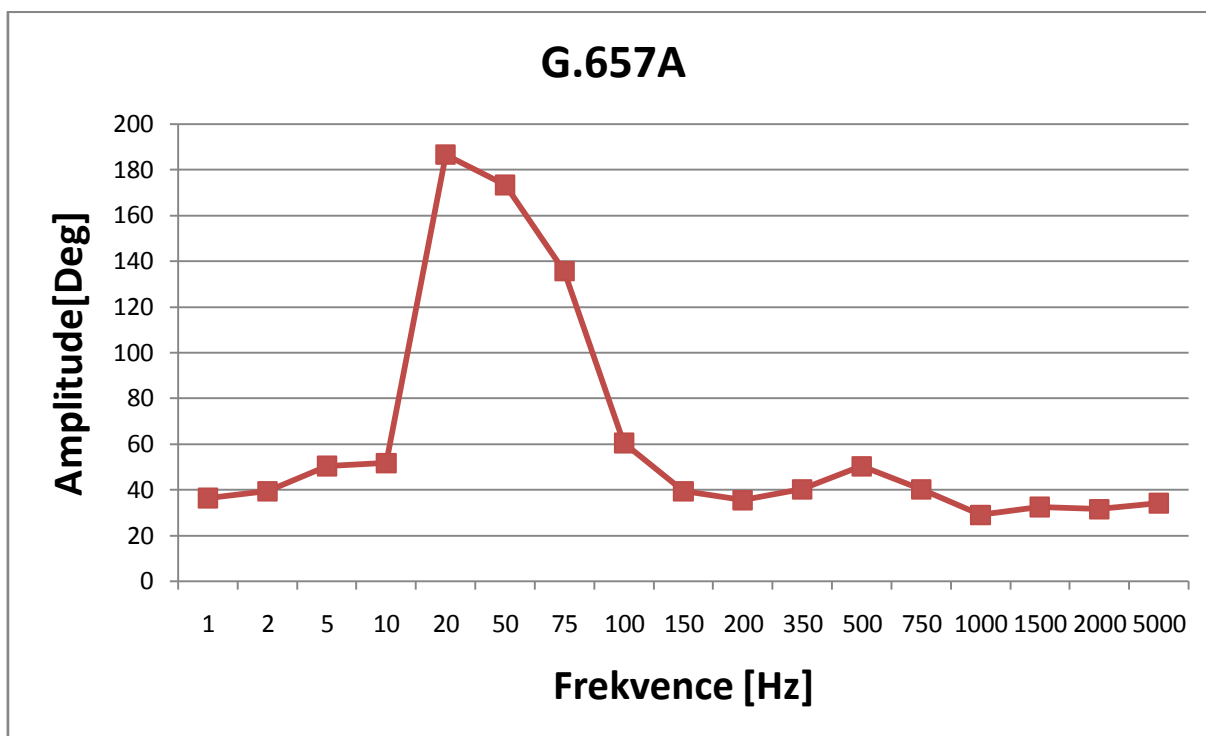
Obrázek 7.1: Vlákno v jacket ochraně[26]



Obrázek 7.2: Stripované vlákno[27]

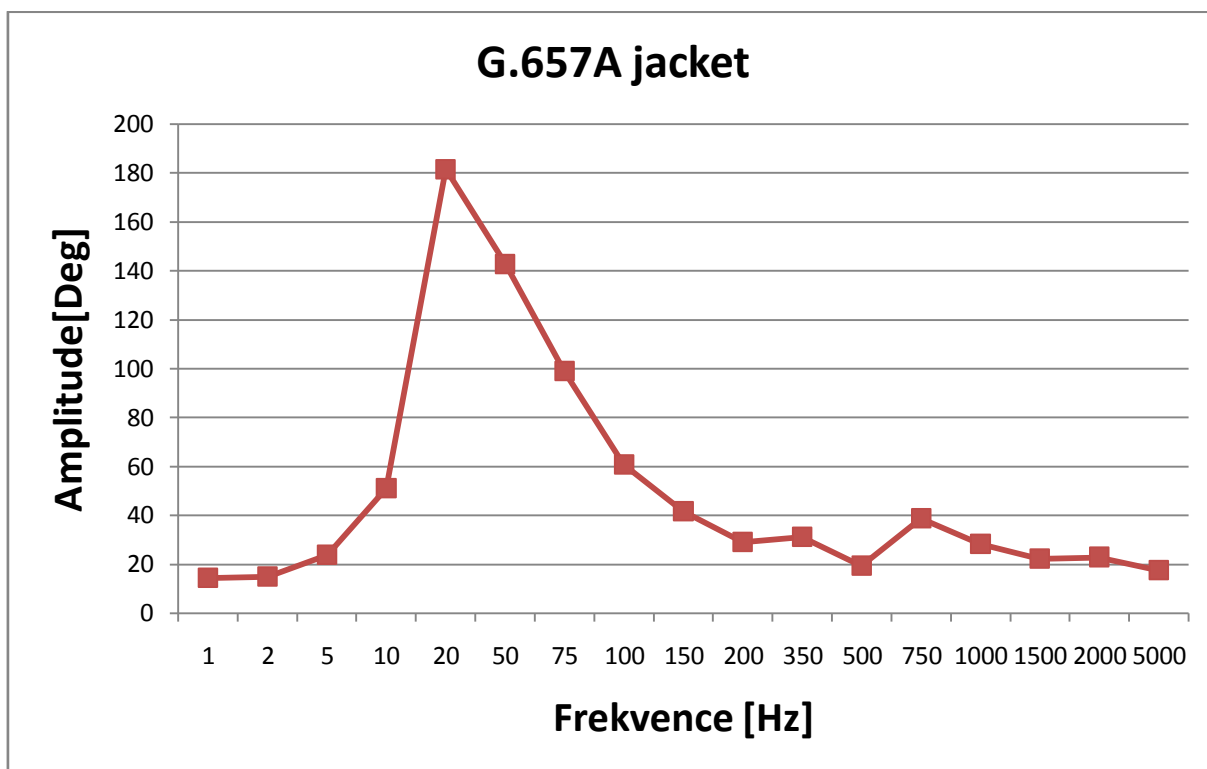
Podrobnější naměřené hodnoty pro tato vlákna vyobrazují přílohy A, B a C.

### 7.1.1 Verze G.657A



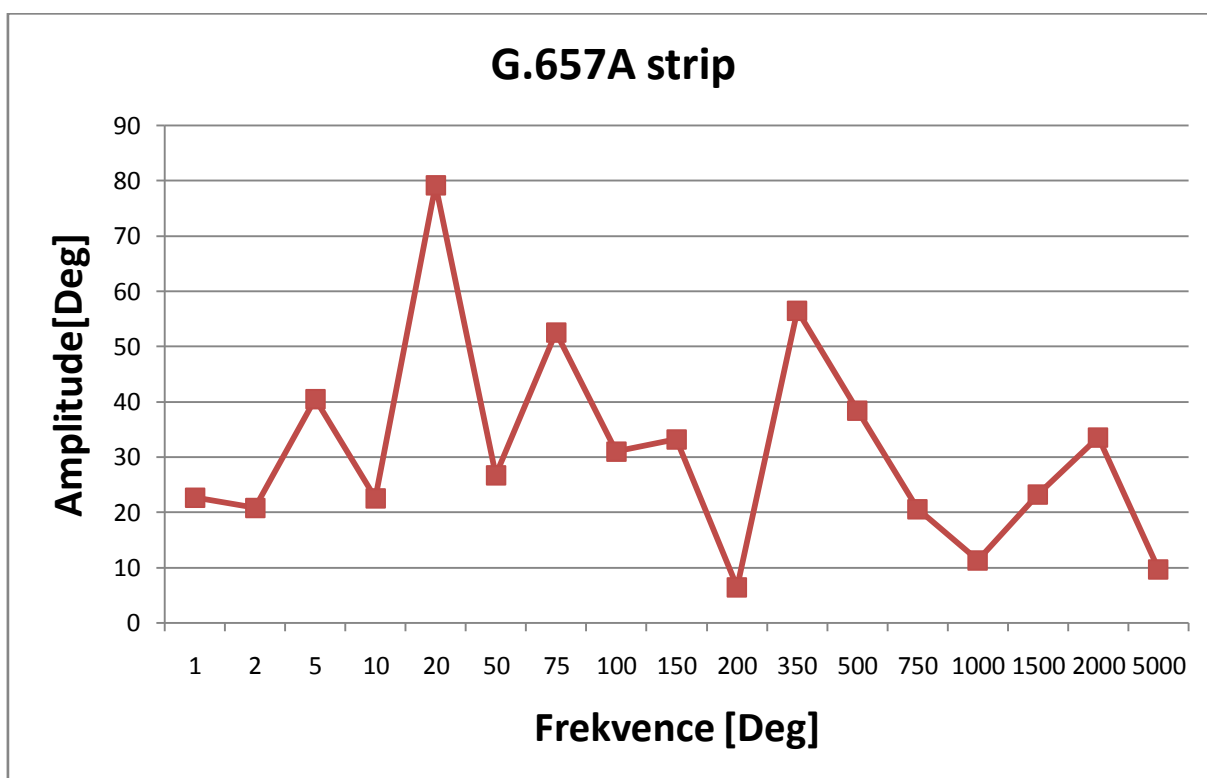
Obrázek 7.3: Výsledný graf optického vlákna G.657A

### 7.1.2 Verze G.657A jacket



Obrázek 7.4: Výsledný graf optického vlákna G.657A jacket

### 7.1.3 Verze G.657A strip

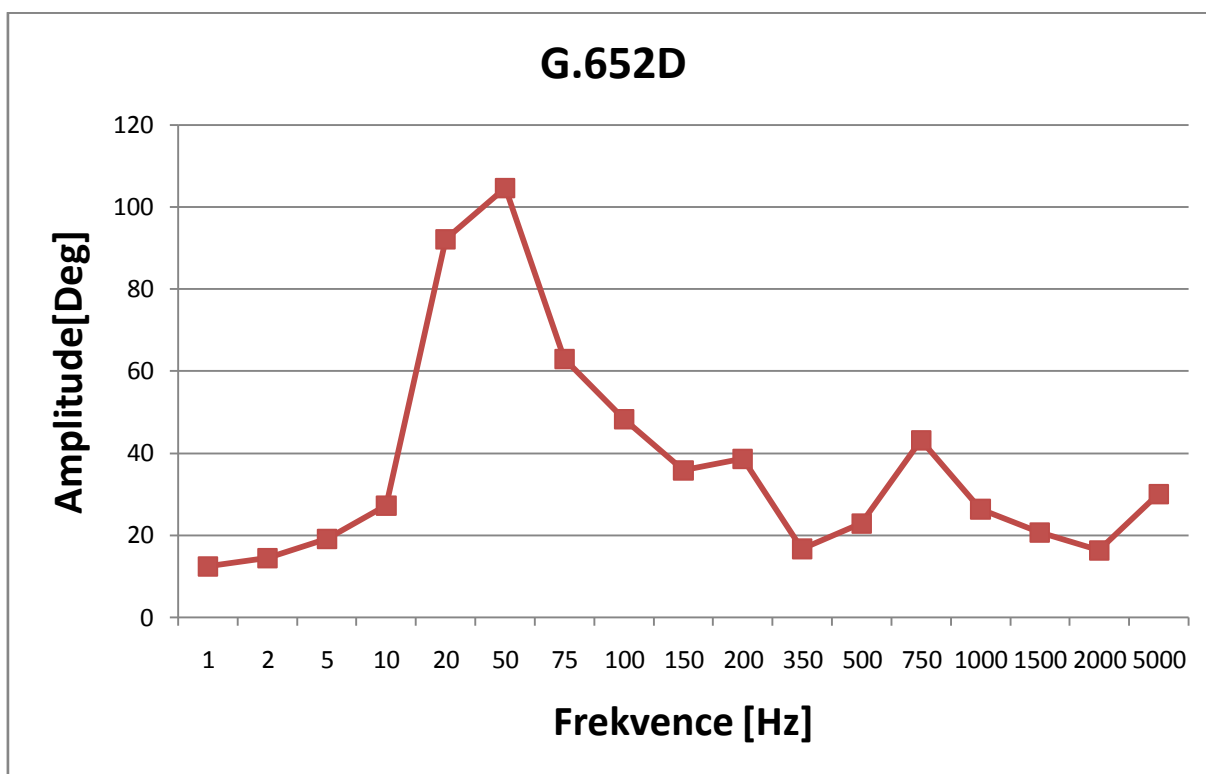


Obrázek 7.5: Výsledný graf optického vlákna G.657A strip

## 7.2 Snímání pomocí optického vlákna G.652D

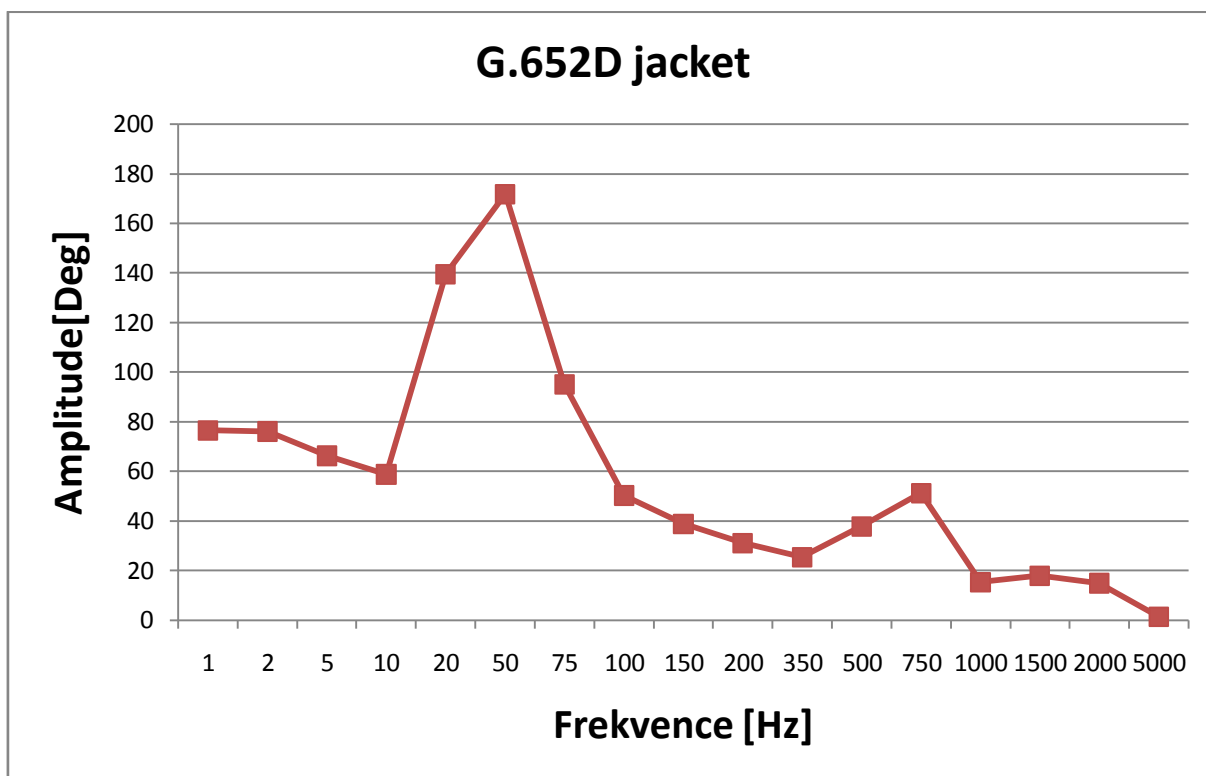
Pro typ vlákna G.652D bylo rovněž provedeno deset naměrů po sedmnácti frekvencích a následně jejich průměr. Následující grafy 7.4 až 7.6 vyobrazují průměr naměřených hodnot pro vlákna G.652D, G.652D jacket a G.652D strip. Podrobnější naměřené hodnoty pro tato vlákna vyobrazují přílohy D, E a F.

### 7.2.1 Verze G.652D



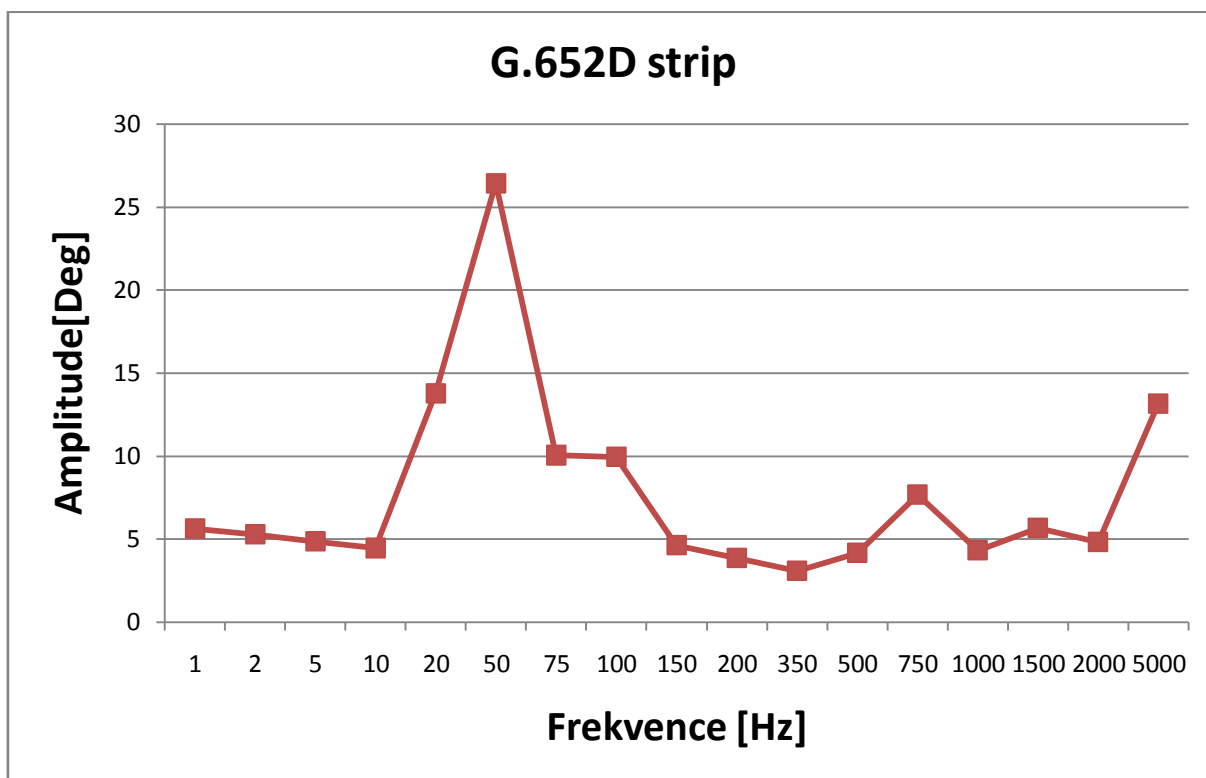
Obrázek 7.6: Výsledný graf optického vlákna G.652D

### 7.2.2 Verze G.652D jacket



Obrázek 7.7: Výsledný graf optického vlákna G.652D jacket

### 7.2.3 Verze G.652D strip

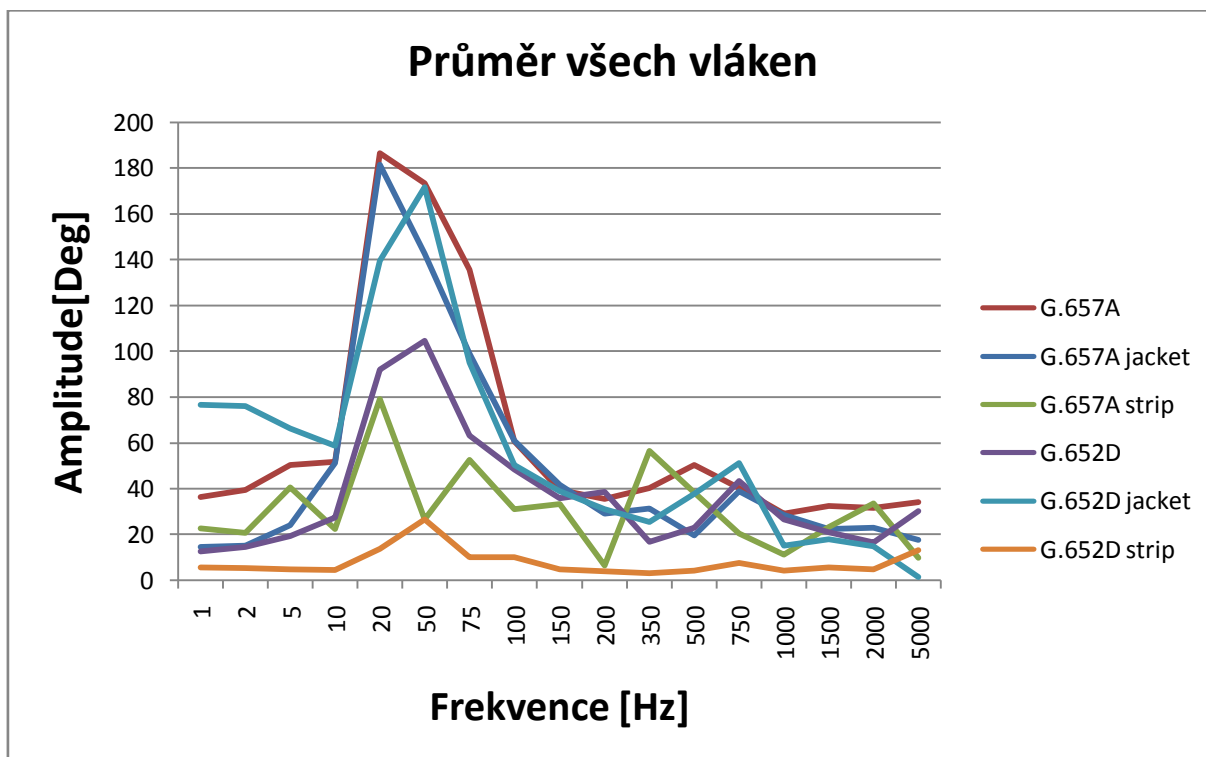


Obrázek 7.8: Výsledný graf optického vlákna G.652D strip



## 8 Porovnání naměřených dat vzhledem k použitému vláknu

Graf 8.1 porovnává průměr jednotlivých vláken mezi sebou. Lze vypořadovat zvýšenou citlivost obou vláken typu jacket a vlákna G.657A na 20 Hz a 50 Hz. Mezi vlákna, která vykazují nejmenší citlivost patří vlákno G.652D strip a vlákno G.657A strip.



Obrázek 8.1: Výsledný graf pro všechna optická vlákna

Tabulka 8.1: Parametry testovaných vláken

| Typ vlákna  | G.657A                | G.652D                |
|---|-----------------------|-----------------------|
| Průměr vidového pole na 1310 nm                       | 9,6-9,5 $\mu\text{m}$ | 8,6-9,5 $\mu\text{m}$ |
| Průměr pláště   | 125,0 $\mu\text{m}$   | 125,0 $\mu\text{m}$   |
| Nekruhovost pláště                                    | 1,0 %                 | 1,0 %                 |
| Odchylka středu vidového pole od středu pláště vlákna | 0,5 $\mu\text{m}$     | 0,6 $\mu\text{m}$     |

## Závěr

Tato bakalářská práce byla věnována vlastnostem světla, které úzce souvisí s jeho šířením ve vláknech. Následoval popis typů optických vláken, která se v praxi mohou vyskytovat. Pro měření byla vybrána jednovidová vlákna.

Samotné testování bylo provedeno na dvou odlišných optických vláknech, z čehož každé ve třech variantách majících různé stupně ochrany. Každé z vláken bylo testováno deseti náměry po sedmnácti frekvencích. Snímání vibrací bylo prováděno za pomoci tří detektorů, jejichž informace byly zasílány dále do měřicí karty, která byla následně schopna zpracovat informace pro notebook s programem LabVIEW. Hodnoty získané z využití aplikace Signal Analyzer pro každý náměr jednotlivých vláken, byly sečteny pro každou frekvenci zvlášť, a byl proveden průměr.

První testované vlákno G.657A vykazovalo zvýšenou citlivost v oblasti 20 Hz a 50 Hz. Bylo možné zaznamenat poměrně stále vysokou citlivost i v oblasti 75 Hz. Na zbylých frekvencích na citlivosti velmi ztratilo.

Druhým vláknem byl stejný typ jako v předchozím případě, avšak ve variantě jacket. Vlákno v porovnání s prvním testovaným vykazovalo téměř totožné zvýšení citlivosti v oblastech 20-75 Hz. Viditelnější změna nastala v náměrech 1,2 a 500 Hz, kde jsou hodnoty nižší.

Třetí variantou onoho vlákna je vlákno G.657A strip. Stripovaná verze vlákna vykazovala nízké hodnoty citlivosti. Mezi jednotlivými testovanými frekvencemi docházelo k výrazným nárůstům a následným poklesům. Největší citlivost byla naměřena v oblasti 20 Hz naopak nejnižší v oblasti 200 Hz.

Na řadu přichází vlákno G.652D, které jevílo velmi obdobné navýšení citlivosti jako vlákno G.657A, avšak v poněkud nižších mezních hodnotách. Výraznější propady hodnot nastaly v oblastech 1, 350 a 2000 Hz.

Vlákno G.652D v jacket verzi vykazovalo postupný úbytek citlivosti směrem od nejnižších po nejvyšší testované frekvence. Byly zaznamenány dvě oblasti, kde citlivost výrazněji narostla. První oblastí je rozmezí frekvencí 20 - 75 Hz. Druhou je oblast 500 Hz a 750 Hz.

Poslední testovanou variantou bylo vlákno G.652D strip. Oproti druhé stripované verzi vlákna, se nevyskytly v náměrech extrémní výkyvy nárůstů a poklesů v citlivosti. Z hlediska všech testovaných frekvencí se hodnoty významněji navýšily v oblasti 20, 50 a 5000 Hz.

Dle zpracovaných hodnot lze vidět, že vlákna s nejvyšším stupněm ochrany u kterých byla očekávána nejmenší citlivost, byla naopak nejcitlivější, a to zejména v oblastech 20 Hz a 50 Hz. Tento nárůst citlivosti mohl být způsoben zvýšeným fyzickým pohybem na reproduktoru, a to z důvodu přítomnosti vícera ochranných vrstev, které měly za následek menší přilnavost. Stripovaná vlákna se překvapivě projevila jako nejméně citlivá na vibrace. Tato nízká citlivost se zejména projevila na vlákně G.652D strip.

Pro snímání zvukových vibrací se tedy jako nejcitlivější a tedy nejvhodnější jevíly ony varianty vláken s ochranou jacket a zároveň vlákno typu G.657A.

## Použitá literatura

- [1] Svetlo. *dobre-svetlo.cz* [online]. [cit. 2016-12-26] Dostupné z: <http://www.dobre-svetlo.cz/svetlo.php>
- [2] Odraz a lom světla. *fyzika007.cz* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/optika/odraz-a-lom-svetla>
- [3] Disperze rozklad světla. *reichl.com* [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://fyzika.reichl.com/main.article/view/441-disperze-rozklad-svetla>
- [4] Disperze. *gymhol.cz* [online]. [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: [http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/03\\_disperze/03\\_disperze.htm](http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/03_disperze/03_disperze.htm)
- [5] ŤUPA, Martin. *Polarizační vidová disperze - PMD* [online]. Brno, 2011 [cit. 2017-04-22]. Diplomová práce VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, ústav telekomunikací. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=37634](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=37634)
- [6] Chrom-disperze. *mikrokom.eu* [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.mikrokom.eu/cz/pdf/chrom-disperze.pdf>
- [7] Difrakce. *gymhol.cz* [online]. [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: [http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/09\\_difrakce/09\\_difrakce.htm](http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/09_difrakce/09_difrakce.htm)
- [8] Polarizace. *gymhol.cz* [online]. [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: [http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/10\\_polar/10\\_polar.htm](http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/10_polar/10_polar.htm)
- [9] UDD, Eric. *FiberOpticSensors: AnIntroductionforEngineers and Scientists*. 2.Series.United States of America: Wiley.1991. ISBN 0-471-83007-0.
- [10] Interference světla. *gymhol.cz* [online]. [cit. 2016-12-27] Dostupné z: [http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/08\\_interf/08\\_interf.htm](http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/08_interf/08_interf.htm)
- [11] Koherence. *vutbr.cz* [online]. [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0206.htm>
- [12] Aplikovaná optika I. Josef Kuběna Učební pomůcka zejména pro studenty optometrie na LF. *slideplayer.cz* [online]. [cit. 2016-12-27] Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3105380/>
- [13] RÝC, Jan. *Michelsonův interferometr*. [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-12-26]. Diplomová práce VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, ústav automatizace a měřicí techniky. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=38584](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38584)
- [14] Jaminův interferometr. *vutbr.cz* [online]. [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/1302.htm>
- [15] SODOMKA, Pavel. *Měření úhlové rychlosti optovláknovým interferometrem* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-12-19]. Bakalářská práce VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, ústav automatizace a měřicí techniky. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=56591](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=56591)

- [16] Manuál k přesnému interferometru LEOI-22. *cvut.cz* [online]. [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: [http://departments.fsv.cvut.cz/k102/sites/default/files/k102/vyuka/predmety/soubory/LEOI-22\\_manual\\_cz.pdf](http://departments.fsv.cvut.cz/k102/sites/default/files/k102/vyuka/predmety/soubory/LEOI-22_manual_cz.pdf)
- [17] Fabryův-Pérotův interferometr. *vutbr.cz* [online]. [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/1305.htm>
- [18] Machův-Zehnderův interferometr. *vutbr.cz* [online]. [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/1304.htm>
- [19] LÓPEZ-HIGUERA, José Miguel. *Handbook of optical fibre sensing technology*. New York: Wiley, 2002. ISBN 0-471-82053-9.
- [20] HAMEG HMF2550, *rohde-schwarz.com* [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://shop.rohde-schwarz.com/cz/hamegr-hmf2550.html>
- [21] NAVRÁTIL, Leoš a kolektiv. *Nové pohledy na neinvazivní laser*. 1.vyd. Praha, 2015. ISBN 978-80-247-5929-6.
- [22] Couplerysplittery. *opticekabely.cz* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.opticekabely.cz/index.php/prislusenstvi/couplerysplittery>
- [23] Fotodetektor. *thorlabs.com* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=4&pn=PDA10CS-EC](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4&pn=PDA10CS-EC)
- [24] Model USB-6210. *ni.com* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz/support/model.usb-6210.html>
- [25] Optické standardy. *dipolnet.cz* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: [http://www.dipolnet.cz/opticke\\_standardy\\_bib327.htm](http://www.dipolnet.cz/opticke_standardy_bib327.htm)
- [26] Products. *fs.com* [online]. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://www.fs.com/products/30976.html>
- [27] Fiber optic basics. *newport.com* [online]. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <https://www.newport.com/t/fiber-optic-basics>

## Seznam příloh

|            |   |   |
|------------|---|---|
| Příloha A: | Naměřené hodnoty pro vlákno G.657A .....        | I |
| Příloha B: | Naměřené hodnoty pro vlákno G.657A jacket ..... | I |
| Příloha C: | Naměřené hodnoty pro vlákno G.657A strip.....   | I |
| Příloha D: | Naměřené hodnoty pro vlákno G.652D .....        | I |
| Příloha E: | Naměřené hodnoty pro vlákno G.652D jacket ..... | I |
| Příloha F: | Naměřené hodnoty pro vlákno G.652D strip .....  | I |

# Naměřené hodnoty pro vlákno G.657A

Příloha A: *Naměřené hodnoty pro vlákno G.657A*

| G.657A    |                 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Náměr     | 1               | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | Průměr |
| Frekvence | Amplitude [Deg] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| [Hz]      |                 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 1         | 24,00           | 26,00  | 9,50   | 25,00  | 5,00   | 24,50  | 50,00  | 28,70  | 96,00  | 76,20  | 36,49  |
| 2         | 29,00           | 52,00  | 23,00  | 7,00   | 5,15   | 25,70  | 58,00  | 32,50  | 86,00  | 75,20  | 39,36  |
| 5         | 38,00           | 51,50  | 14,10  | 112,00 | 13,20  | 32,50  | 48,00  | 32,50  | 93,00  | 69,70  | 50,45  |
| 10        | 115,00          | 68,00  | 15,00  | 60,00  | 31,80  | 45,00  | 37,00  | 34,10  | 98,00  | 13,00  | 51,69  |
| 20        | 223,00          | 133,00 | 72,50  | 263,00 | 124,00 | 42,00  | 230,00 | 205,00 | 113,00 | 460,00 | 186,55 |
| 50        | 35,00           | 157,00 | 268,00 | 172,00 | 140,00 | 63,00  | 220,00 | 288,00 | 260,00 | 130,00 | 173,30 |
| 75        | 60,50           | 92,90  | 267,00 | 150,00 | 81,00  | 108,00 | 120,00 | 200,00 | 117,00 | 160,00 | 135,64 |
| 100       | 27,00           | 28,40  | 110,30 | 42,70  | 58,20  | 76,00  | 31,50  | 37,50  | 64,00  | 130,00 | 60,56  |
| 150       | 43,00           | 2,90   | 40,80  | 30,60  | 21,30  | 17,00  | 29,00  | 36,80  | 50,00  | 12,20  | 39,42  |
| 200       | 37,00           | 10,50  | 11,10  | 31,50  | 24,60  | 34,20  | 32,60  | 52,00  | 81,00  | 41,00  | 35,55  |
| 350       | 32,00           | 74,50  | 50,90  | 18,00  | 25,00  | 43,00  | 34,50  | 45,50  | 22,40  | 56,50  | 40,23  |
| 500       | 49,00           | 102,00 | 58,00  | 48,00  | 38,20  | 46,00  | 42,50  | 39,30  | 51,00  | 29,00  | 50,30  |
| 750       | 40,00           | 90,80  | 36,30  | 37,50  | 51,10  | 21,50  | 36,40  | 54,50  | 26,10  | 8,00   | 40,22  |
| 1000      | 27,00           | 42,30  | 22,20  | 56,80  | 42,00  | 48,50  | 16,30  | 18,10  | 12,00  | 5,70   | 29,09  |
| 1500      | 43,70           | 50,00  | 54,00  | 31,20  | 32,50  | 50,50  | 31,50  | 26,80  | 2,58   | 2,86   | 32,56  |
| 2000      | 33,70           | 61,30  | 26,00  | 70,00  | 55,00  | 8,50   | 22,00  | 21,60  | 8,70   | 9,60   | 31,64  |
| 5000      | 32,80           | 57,60  | 50,30  | 61,10  | 57,40  | 24,60  | 11,30  | 13,60  | 15,40  | 18,20  | 34,23  |

# Naměřené hodnoty pro vlákno G.657A jacket

Příloha B: *Naměřené hodnoty pro vlákno G.657A jacket*

| G.657A jacket |                 |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |
|---------------|-----------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| Náměr         | 1               | 2     | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | Průměr |  |
| Frekvence     |                 |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |
| [Hz]          | Amplitude [Deg] |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |
| 1             | 15,60           | 2,75  | 20,00  | 1,25   | 6,75   | 7,25   | 4,40   | 45,80  | 30,90  | 9,60   | 14,43  |  |
| 2             | 21,80           | 2,00  | 20,00  | 6,00   | 11,00  | 6,25   | 1,52   | 44,00  | 28,20  | 8,30   | 14,91  |  |
| 5             | 24,80           | 13,30 | 40,00  | 4,25   | 11,40  | 3,25   | 41,00  | 59,50  | 30,70  | 11,30  | 23,95  |  |
| 10            | 33,00           | 4,60  | 42,00  | 17,50  | 46,00  | 45,00  | 45,20  | 119,70 | 47,00  | 110,00 | 51,00  |  |
| 20            | 182,00          | 75,00 | 203,00 | 89,00  | 440,00 | 104,00 | 284,00 | 182,00 | 109,00 | 148,00 | 181,60 |  |
| 50            | 80,00           | 61,00 | 164,00 | 110,00 | 64,00  | 89,00  | 232,00 | 213,00 | 218,00 | 197,00 | 142,80 |  |
| 75            | 194,00          | 34,20 | 55,00  | 9,90   | 130,00 | 12,50  | 108,00 | 186,00 | 155,00 | 105,00 | 98,96  |  |
| 100           | 89,00           | 22,40 | 46,00  | 21,90  | 50,00  | 16,75  | 151,00 | 50,00  | 88,00  | 73,00  | 60,81  |  |
| 150           | 75,00           | 34,30 | 20,30  | 44,00  | 32,00  | 18,30  | 7,25   | 63,00  | 62,00  | 61,00  | 41,72  |  |
| 200           | 33,00           | 42,00 | 40,00  | 24,10  | 47,50  | 15,40  | 2,60   | 31,90  | 21,60  | 32,00  | 29,01  |  |
| 350           | 31,00           | 36,80 | 18,10  | 44,00  | 51,20  | 11,40  | 30,30  | 19,30  | 25,40  | 43,60  | 31,11  |  |
| 500           | 13,15           | 13,50 | 15,10  | 26,00  | 32,80  | 23,40  | 28,40  | 7,25   | 28,40  | 6,15   | 19,42  |  |
| 750           | 28,75           | 59,00 | 28,00  | 51,80  | 52,50  | 15,80  | 46,00  | 8,10   | 53,90  | 45,00  | 38,89  |  |
| 1000          | 20,20           | 56,40 | 39,00  | 52,00  | 44,70  | 23,00  | 17,60  | 2,14   | 15,20  | 13,60  | 28,38  |  |
| 1500          | 39,20           | 23,00 | 23,00  | 58,50  | 25,00  | 10,50  | 1,40   | 14,80  | 10,30  | 16,15  | 22,19  |  |
| 2000          | 36,10           | 47,00 | 15,40  | 38,00  | 29,50  | 8,75   | 7,90   | 7,65   | 14,25  | 24,70  | 22,93  |  |
| 5000          | 44,00           | 27,50 | 9,10   | 35,80  | 16,80  | 0,96   | 13,10  | 7,95   | 12,5   | 7,20   | 17,49  |  |

# Naměřené hodnoty pro vlákno G.657A strip

Příloha C: *Naměřené hodnoty pro vlákno G.657A strip*

| G.657A strip      |                 |       |        |       |       |       |       |       |       |       |        |
|-------------------|-----------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Náměr             | 1               | 2     | 3      | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | Průměr |
| Frekvence<br>[Hz] | Amplitude [Deg] |       |        |       |       |       |       |       |       |       |        |
| 1                 | 28,00           | 13,00 | 24,00  | 23,30 | 24,10 | 26,10 | 23,80 | 22,80 | 23,50 | 18,00 | 22,66  |
| 2                 | 3,40            | 16,00 | 23,00  | 22,10 | 23,20 | 23,90 | 23,00 | 20,50 | 29,40 | 23,50 | 20,80  |
| 5                 | 188,00          | 21,00 | 21,50  | 23,80 | 24,60 | 28,20 | 21,40 | 23,10 | 25,70 | 27,10 | 40,44  |
| 10                | 13,40           | 36,00 | 20,40  | 21,60 | 24,10 | 26,00 | 22,50 | 22,20 | 19,40 | 19,10 | 22,47  |
| 20                | 58,00           | 82,00 | 114,50 | 86,00 | 89,00 | 74,00 | 72,50 | 66,00 | 76,00 | 73,50 | 79,15  |
| 50                | 35,20           | 42,50 | 34,80  | 25,30 | 22,50 | 22,10 | 21,40 | 21,30 | 19,50 | 22,30 | 26,69  |
| 75                | 39,00           | 64,00 | 60,00  | 53,00 | 49,00 | 53,00 | 47,50 | 53,00 | 54,00 | 52,50 | 52,50  |
| 100               | 20,50           | 43,50 | 38,00  | 38,00 | 27,50 | 23,00 | 29,30 | 30,50 | 30,50 | 29,10 | 30,99  |
| 150               | 20,10           | 33,70 | 44,80  | 35,00 | 30,00 | 30,00 | 33,50 | 34,50 | 33,00 | 37,00 | 33,16  |
| 200               | 14,50           | 8,85  | 5,00   | 6,20  | 5,15  | 3,65  | 4,25  | 5,15  | 5,95  | 5,50  | 6,42   |
| 350               | 23,50           | 67,50 | 77,00  | 67,60 | 52,00 | 49,30 | 53,00 | 59,00 | 61,80 | 54,00 | 56,47  |
| 500               | 14,20           | 42,80 | 47,40  | 41,50 | 52,50 | 32,60 | 36,00 | 38,90 | 39,10 | 38,50 | 38,35  |
| 750               | 30,10           | 15,85 | 20,05  | 22,50 | 16,75 | 19,10 | 16,40 | 17,20 | 24,30 | 22,80 | 20,51  |
| 1000              | 5,85            | 30,80 | 26,50  | 5,85  | 20,10 | 7,80  | 5,30  | 3,00  | 3,61  | 3,50  | 11,23  |
| 1500              | 42,90           | 46,50 | 56,00  | 16,80 | 34,50 | 7,20  | 11,00 | 10,40 | 4,50  | 2,00  | 23,18  |
| 2000              | 60,00           | 26,00 | 47,50  | 45,50 | 42,05 | 27,70 | 27,00 | 23,50 | 18,50 | 17,20 | 33,50  |
| 5000              | 9,00            | 19,80 | 6,85   | 13,20 | 19,70 | 3,23  | 7,55  | 7,85  | 5,85  | 3,82  | 9,69   |



# Naměřené hodnoty pro vlákno G.652D

Příloha D: *Naměřené hodnoty pro vlákno G.652D*

| G.652D    |                 |        |        |       |        |        |        |        |       |        |        |
|-----------|-----------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Náměr     | 1               | 2      | 3      | 4     | 5      | 6      | 7      | 8      | 9     | 10     | Průměr |
| Frekvence | Amplitude [Deg] |        |        |       |        |        |        |        |       |        |        |
| [Hz]      |                 |        |        |       |        |        |        |        |       |        |        |
| 1         | 4,90            | 9,00   | 2,20   | 5,80  | 16,50  | 8,80   | 8,40   | 9,70   | 0,38  | 59,00  | 12,47  |
| 2         | 5,40            | 6,00   | 15,00  | 8,10  | 22,50  | 6,70   | 8,30   | 9,30   | 0,85  | 63,00  | 14,52  |
| 5         | 12,10           | 8,00   | 32,00  | 22,50 | 21,50  | 5,10   | 8,85   | 7,40   | 2,76  | 71,00  | 19,12  |
| 10        | 19,15           | 10,60  | 23,50  | 42,00 | 22,30  | 29,50  | 9,90   | 4,20   | 17,00 | 95,00  | 27,32  |
| 20        | 185,00          | 94,00  | 53,00  | 81,00 | 135,00 | 99,00  | 41,00  | 56,00  | 76,00 | 101,00 | 92,10  |
| 50        | 157,00          | 163,00 | 155,00 | 72,00 | 28,20  | 96,00  | 150,00 | 145,00 | 16,00 | 64,00  | 104,62 |
| 75        | 43,60           | 100,00 | 10,90  | 15,60 | 65,00  | 106,00 | 70,30  | 84,00  | 40,00 | 95,00  | 63,04  |
| 100       | 32,50           | 46,00  | 9,20   | 10,10 | 27,00  | 68,40  | 96,80  | 53,50  | 56,90 | 83,00  | 48,34  |
| 150       | 23,90           | 52,00  | 21,60  | 9,10  | 13,50  | 39,80  | 42,00  | 54,60  | 62,00 | 40,00  | 35,85  |
| 200       | 37,50           | 25,00  | 37,50  | 6,70  | 6,20   | 56,20  | 59,00  | 76,80  | 16,30 | 65,00  | 38,62  |
| 350       | 15,35           | 12,20  | 29,00  | 9,10  | 9,60   | 44,60  | 12,60  | 9,10   | 8,30  | 17,70  | 16,76  |
| 500       | 40,20           | 18,00  | 4,40   | 18,50 | 15,00  | 64,50  | 29,20  | 6,60   | 22,00 | 10,65  | 22,91  |
| 750       | 39,00           | 48,00  | 32,50  | 16,20 | 25,50  | 24,20  | 112,50 | 74,50  | 12,00 | 48,00  | 43,24  |
| 1000      | 22,10           | 20,50  | 2,30   | 24,00 | 9,50   | 32,40  | 36,50  | 40,70  | 12,10 | 64,00  | 26,41  |
| 1500      | 67,70           | 6,10   | 6,20   | 16,00 | 3,50   | 13,70  | 31,00  | 7,20   | 30,00 | 26,20  | 20,76  |
| 2000      | 12,25           | 11,00  | 25,00  | 12,60 | 20,50  | 6,40   | 20,20  | 15,60  | 27,20 | 12,20  | 16,30  |
| 5000      | 57,85           | 31,50  | 12,50  | 36,00 | 11,50  | 37,00  | 8,70   | 36,90  | 53,50 | 15,00  | 30,05  |

# Naměřené hodnoty pro vlákno G.652D jacket

Příloha E: *Naměřené hodnoty pro vlákno G.652D jacket*

| G.652D jacket |                 |        |        |        |        |        |        |       |        |        |        |
|---------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Náměr         | 1               | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8     | 9      | 10     | Průměr |
| Frekvence     | Amplitude [Deg] |        |        |        |        |        |        |       |        |        |        |
| [Hz]          |                 |        |        |        |        |        |        |       |        |        |        |
| 1             | 12,60           | 200,00 | 23,50  | 39,00  | 130,00 | 94,00  | 121,30 | 53,20 | 22,50  | 70,00  | 76,61  |
| 2             | 5,00            | 190,00 | 27,80  | 45,00  | 130,00 | 91,20  | 115,00 | 56,20 | 30,50  | 71,10  | 76,18  |
| 5             | 9,00            | 120,00 | 32,50  | 43,00  | 133,00 | 79,60  | 108,00 | 37,50 | 29,20  | 72,00  | 66,38  |
| 10            | 29,50           | 175,00 | 6,10   | 28,00  | 46,50  | 73,00  | 65,00  | 54,00 | 90,00  | 22,00  | 58,91  |
| 20            | 205,00          | 235,00 | 198,00 | 165,00 | 41,00  | 110,00 | 148,00 | 51,50 | 187,00 | 54,80  | 139,53 |
| 50            | 96,00           | 132,00 | 129,00 | 182,00 | 278,00 | 113,00 | 345,00 | 66,00 | 167,00 | 210,00 | 171,80 |
| 75            | 98,00           | 100,00 | 45,20  | 26,00  | 142,00 | 106,00 | 235,00 | 66,00 | 20,20  | 114,00 | 95,24  |
| 100           | 23,50           | 55,00  | 18,00  | 35,50  | 36,50  | 56,00  | 105,40 | 31,00 | 125,00 | 18,00  | 50,39  |
| 150           | 16,20           | 43,00  | 35,00  | 28,50  | 9,00   | 70,00  | 100,00 | 45,00 | 13,70  | 29,20  | 38,96  |
| 200           | 27,00           | 12,80  | 47,50  | 19,50  | 31,50  | 48,50  | 34,00  | 21,50 | 30,50  | 38,90  | 31,17  |
| 350           | 6,00            | 37,00  | 8,80   | 34,50  | 20,75  | 77,50  | 32,50  | 22,40 | 5,15   | 9,90   | 25,45  |
| 500           | 20,10           | 85,00  | 11,00  | 9,00   | 92,00  | 33,50  | 63,50  | 16,50 | 26,30  | 22,40  | 37,93  |
| 750           | 11,50           | 96,00  | 14,90  | 79,00  | 24,50  | 105,00 | 64,00  | 46,00 | 9,70   | 62,00  | 51,26  |
| 1000          | 21,80           | 15,00  | 0,95   | 0,83   | 50,00  | 14,35  | 31,50  | 3,18  | 8,30   | 7,35   | 15,33  |
| 1500          | 20,00           | 22,00  | 17,80  | 17,30  | 17,80  | 6,20   | 25,40  | 10,00 | 14,25  | 29,00  | 17,98  |
| 2000          | 4,05            | 5,40   | 24,50  | 22,00  | 14,40  | 7,25   | 18,30  | 37,50 | 5,38   | 11,50  | 15,03  |
| 5000          | 0,90            | 1,45   | 0,77   | 1,20   | 2,35   | 0,80   | 0,26   | 3,61  | 2,38   | 1,26   | 1,50   |

# Naměřené hodnoty pro vlákno G.652D strip

Příloha F: *Naměřené hodnoty pro vlákno G.652D strip*

| G.652D strip      |                 |       |       |       |       |       |       |       |      |       |        |
|-------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|--------|
| Náměr             | 1               | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9    | 10    | Průměr |
| Frekvence<br>[Hz] | Amplitude [Deg] |       |       |       |       |       |       |       |      |       |        |
| 1                 | 5,50            | 6,00  | 11,20 | 2,35  | 3,20  | 10,50 | 8,30  | 4,40  | 2,90 | 1,90  | 5,63   |
| 2                 | 1,50            | 9,50  | 7,00  | 3,40  | 7,60  | 11,50 | 6,85  | 1,14  | 2,34 | 1,78  | 5,26   |
| 5                 | 3,25            | 5,50  | 1,70  | 6,70  | 2,75  | 14,30 | 5,35  | 5,30  | 1,58 | 1,95  | 4,84   |
| 10                | 0,93            | 3,30  | 7,10  | 2,75  | 3,80  | 9,20  | 4,63  | 5,75  | 4,80 | 2,20  | 4,45   |
| 20                | 16,70           | 27,00 | 5,80  | 16,50 | 17,80 | 17,40 | 1,40  | 17,20 | 8,50 | 9,40  | 13,77  |
| 50                | 18,80           | 25,80 | 30,00 | 61,00 | 51,00 | 18,40 | 11,40 | 11,20 | 5,65 | 31,00 | 26,43  |
| 75                | 13,50           | 5,90  | 7,25  | 8,00  | 18,00 | 11,20 | 8,40  | 10,60 | 7,55 | 10,00 | 10,04  |
| 100               | 8,80            | 15,00 | 10,60 | 5,30  | 12,60 | 13,80 | 7,90  | 9,80  | 5,80 | 9,70  | 9,93   |
| 150               | 3,00            | 3,75  | 3,90  | 1,30  | 9,00  | 7,40  | 1,45  | 2,30  | 5,40 | 8,80  | 4,63   |
| 200               | 4,05            | 6,80  | 0,62  | 3,80  | 7,30  | 1,93  | 3,15  | 1,40  | 3,85 | 5,50  | 3,84   |
| 350               | 1,30            | 1,65  | 2,90  | 1,80  | 2,70  | 2,36  | 7,80  | 5,10  | 1,60 | 3,55  | 3,08   |
| 500               | 2,90            | 5,00  | 3,50  | 5,00  | 3,80  | 5,70  | 5,70  | 6,00  | 0,86 | 3,05  | 4,15   |
| 750               | 12,50           | 7,50  | 1,95  | 7,60  | 18,40 | 5,60  | 5,15  | 2,68  | 7,25 | 7,90  | 7,65   |
| 1000              | 5,20            | 7,50  | 2,30  | 4,30  | 3,75  | 6,85  | 5,54  | 2,67  | 1,70 | 3,33  | 4,31   |
| 1500              | 6,90            | 5,00  | 1,85  | 4,25  | 5,00  | 10,70 | 3,45  | 4,90  | 6,08 | 8,50  | 5,66   |
| 2000              | 1,65            | 4,50  | 1,41  | 1,75  | 3,00  | 12,20 | 3,74  | 2,24  | 8,50 | 9,10  | 4,81   |
| 5000              | 11,60           | 14,80 | 19,50 | 25,50 | 8,60  | 13,00 | 20,00 | 5,45  | 8,10 | 5,03  | 13,16  |